

Trabajo Fin de Grado:

Estudio experimental de
inestabilidades de llamas en
microcanales

uc3m | Universidad **Carlos III** de Madrid

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA TÉRMICA Y DE FLUIDOS

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

2017-2018

Miriam Fernández Rodríguez

Tutor: Daniel Martínez Ruiz

Leganés, 3 de julio de 2018

RESUMEN

En este trabajo se pretende caracterizar la propagación de llamas en microcanales mediante el estudio experimental de las inestabilidades que presentan.

Este estudio consiste en la realización de vídeos a alta velocidad de la propagación de llamas de combustibles gaseosos en cámaras muy esbeltas, variando tanto el gas, metano o propano, como la riqueza de la mezcla (dosado), así como la configuración, espesor y material de la tapa de la cámara de combustión. Después, se procede al tratamiento de las imágenes generadas durante los experimentos, a través del desarrollo de un conjunto de algoritmos y aplicaciones, mediante el uso del programa de código abierto *Image-J* y el programa *Matlab*.

De esta forma, se obtiene el porcentaje de área quemada, el ritmo de quemado y número de celdas que presenta el frente de llama en cada instante de tiempo. Los resultados extraídos muestran que los algoritmos desarrollados a lo largo de este trabajo pueden contribuir a la caracterización de las llamas de premezcla y sus inestabilidades.

Palabras clave – combustión; llamas de premezcla; propagación; tratamiento de imagen

ABSTRACT

In this thesis, we intend to characterize the propagation of flames in microchannels through the experimental study of the instabilities they present.

This study consists in the realization of high speed videos of the propagation of gaseous fuel flames in very slender chambers, varying both gas, methane or propane, as well as the richness of the mixture (dosed), the configuration, thickness and material of the lid of the combustion chamber. Then, the images generated during the experiments are processed, through the development of a set of algorithms and applications, using the open source program *Image-J* and the *Matlab* software.

In this way, the percentage of the burnt area, the burning rate and the number of cells presented by the flame front at each time instant is obtained. The extracted results show that the algorithms developed throughout this thesis can contribute to the characterization of pre-mix flames and their instabilities.

Keywords – combustion; premix flames; propagation; image processing

Quisiera dar las gracias a mi tutor, Daniel Martínez Ruiz, por facilitarme el aprendizaje y por su paciencia infinita. También a mi familia por su apoyo incondicional y por ayudarme a alcanzar los objetivos que me propongo en la vida.

Índice

1. Introducción	1
1.1 Motivación	2
1.2 Objetivos	3
1.3 Marco regulador	3
2. Estado del arte	5
3. Propagación de llamas de combustibles	7
3.1 Ecuación de la energía	7
3.2 Ecuación de concentración de especies	10
3.3 Comparación difusión térmica vs difusión especies	11
3.4 Reacción química	12
3.5 Inestabilidades	14
3.5.1 Darrieus-Landau	14
3.5.2 Saffman-Taylor	15
3.5.3 Rayleigh-Taylor	15
3.5.4 Efectos termo-difusivos	16
4. Configuración experimental	18
4.1 Descripción de la instalación del laboratorio	18
4.1.1 Cámara de combustión	18
4.1.2 Bujía	19
4.1.3 Controladores de aire y combustible	19
4.1.4 Mezclador	20
4.1.5 Cámara de vídeo de alta velocidad	20

4.1.6	Acelerómetro	21
4.2	Desarrollo experimental.....	22
4.2.1	Protocolo.....	23
5.	Análisis de imagen	26
5.1	Image-J.....	26
5.2	Matlab	27
6.	Desarrollo de los algoritmos	30
6.1	Lectura de imágenes	30
6.2	Tratamiento de imagen	31
6.3	Detección del frente de llama	31
6.4	Cálculo del porcentaje de área quemada.....	35
6.5	Cálculo del ritmo de quemado	36
6.6	Cálculo del número de celdas	37
6.7	Cálculo de la velocidad instantánea.....	39
6.8	Acelerómetro	40
6.8.1	Curva de calibración.....	40
6.8.2	Cálculo del aceleración y velocidad	42
7.	Resultados y análisis.....	43
7.1	Tipo de configuración	43
7.1.1	Configuración cerrado-abierto.....	43
7.1.2	Configuración abierto-cerrado.....	46
7.1.3	Comparación entre ambas configuraciones	50
7.2	Tipo de combustible.....	52
7.2.1	Metano	53

7.2.2	Propano	53
7.2.3	Comparación entre combustibles	56
7.3	Dosado	58
7.3.1	Mezcla estequiométrica	58
7.3.2	Mezcla pobre	59
7.3.3	Mezcla rica	61
7.3.4	Comparación entre distintos valores de dosado	64
7.4	Material de la tapa de la cámara de combustión	67
7.4.1	Vidrio.....	67
7.4.2	Metacrilato de 19 mm.....	68
7.4.3	Metacrilato de 15 mm.....	69
7.4.4	Comparación de las distintas tapas de la cámara.....	70
8.	Planificación y presupuesto	72
8.1	Presupuesto	72
8.2	Impacto socio-económico	75
9.	Conclusiones y trabajos futuros	76
	Referencias bibliográficas.....	79

Índice de figuras

Figura 3.1: Esquema de las zonas respecto al frente de llama	13
Figura 3.2: Esquema de la inestabilidad Darrieus-Landau.....	14
Figura 3.3: Estructura de inestabilidad ST extraída de [38]	15
Figura 3.4: Esquema de los efectos Termo-difusivos	16
Figura 4.1: Perspectiva de la cámara de combustión.....	18
Figura 4.2: Planta de la cámara de combustión.....	19
Figura 4.3: Bujía de la instalación	19
Figura 4.4: Controladores de gasto másico de aire y combustible	20
Figura 4.5: Cámara de alta velocidad	21
Figura 4.6: Esquema de la perspectiva y planta de la cámara de combustión.....	22
Figura 4.7: Esquema de la instalación del laboratorio extraído de [27]	25
Figura 5.1: A la izq., imagen original; a la derecha, imagen procesada en Image-J.	27
Figura 5.2: Proceso completo de detección del frente de llama. [color online]	28
Figura 5.3: Imagen de un frente de llama plano.	28
Figura 5.4: Imagen de un frente de llama con celdas.	29
Figura 6.1: Imagen del frente de llama detectado de un perfil plano.	32
Figura 6.2: Imagen del contorno de un frente de llama con celdas.	32
Figura 6.3: Esquema del método para la detección del frente de llama.	33
Figura 6.4: Frente de llama detectado mediante el uso de este proceso.....	35
Figura 6.5: Frente de llama detectado sobre la imagen original del experimento.....	35
Figura 6.6: Comparación entre número de celdas visibles y calculadas.	39
Figura 6.7: Curva de calibración del acelerómetro.....	41
Figura 7.1: Frente de llama en la config. CO de metano con dosado 1 en $t=0.008s$	44
Figura 7.2: Porcentaje de área quemada en la config. CO de metano con dosado 1.....	44
Figura 7.3: Ritmo de quemado en la configuración CO de metano con dosado 1.	45
Figura 7.4: Número de celdas en la configuración CO de metano con dosado 1.....	46

Figura 7.5: Frente de llama en la config. OC de metano con dosado 1 en $t=0.05s$	47
Figura 7.6: Frente de llama en la config. OC de metano con dosado 1 en $t = 0.08s$	47
Figura 7.7: Porcentaje de área quemada en la config. OC de metano con dosado 1.....	48
Figura 7.8: Ritmo de quemado en la configuración OC de metano con dosado 1,	49
Figura 7.9: Número de celdas en la configuración OC de metano con dosado 1.....	49
Figura 7.10: Comparación porcentaje de área para distintas configuraciones.	50
Figura 7.11: Velocidad media de propagación para distintas configuraciones.	51
Figura 7.12: Frente de llama en la config. OC de propano con dosado 1 en $t=0.22s$	53
Figura 7.13: Porcentaje de área quemada en la config. OC de propano con dosado 1. .	54
Figura 7.14: Frente de llama de propano en $t=0.08s$	54
Figura 7.15: Ritmo de quemado en la configuración OC de propano con dosado 1.....	55
Figura 7.16: Número de celdas en la configuración OC de propano con dosado 1.	55
Figura 7.17: Comparación porcentaje de área para distintos combustibles.	56
Figura 7.18: Velocidad media de propagación para distintos combustibles.	57
Figura 7.19: Frente de llama en la config. OC de metano con dosado 0.8 en $t=0.022s$. 59	
Figura 7.20: Frente de llama en la config. OC de metano con dosado 0.8 en $t=0.083s$. 59	
Figura 7.21: Porcentaje de área quemada en la config. OC de metano con dosado 0.8. 60	
Figura 7.22: Ritmo de quemado en la configuración OC de metano con dosado 0.8. ...	60
Figura 7.23: Número de celdas en la configuración OC de metano con dosado 0.8.....	61
Figura 7.24: Frente de llama en la config. OC de metano con dosado 1.2 en $t=0.015s$. 62	
Figura 7.25: Frente de llama en la config. OC de metano con dosado 1.2 en $t=0.075s$. 62	
Figura 7.26: Porcentaje de área quemada en la config. OC de metano con dosado 1.2. 63	
Figura 7.27: Ritmo de quemado en la configuración OC de metano con dosado 1.2. ...	63
Figura 7.28: Número de celdas en la configuración OC de metano con dosado 1.2.....	64
Figura 7.29: Comparación porcentaje de área para distintos dosados.....	65
Figura 7.30: Velocidad media de propagación para distintos dosados.....	66
Figura 7.31: Aceleración frente al tiempo para tapa superior de vidrio.	67
Figura 7.32: Velocidad frente al tiempo para tapa superior de vidrio.	68

Figura 7.33: Aceleración frente al tiempo para tapa superior de metacrilato de 19mm. 68

Figura 7.34: Velocidad frente al tiempo para tapa superior de metacrilato de 19mm. .. 69

Figura 7.35: Aceleración frente al tiempo para tapa superior de metacrilato de 15mm. 69

Figura 7.36: Velocidad frente al tiempo para tapa superior de metacrilato de 15mm. .. 70

Índice de tablas

Tabla 3.1: Valores típicos de número De Lewis	12
Tabla 4.1: Especificaciones del acelerómetro extraído de [26]	21
Tabla 6.1: Valores de calibración	41
Tabla 7.1: Parámetros del combustible extraído de [27]	52
Tabla 8.1: Tareas y su duración.....	72
Tabla 8.2: Coste personal	73
Tabla 8.3: Coste equipo	73
Tabla 8.4: Coste material.....	74
Tabla 8.5: Resumen presupuesto	74

1. Introducción

En los últimos años, el aumento de la preocupación por cuestiones medioambientales ha hecho que la Unión Europea (UE) y el gobierno español adopten medidas que ayuden a disminuir las emisiones y la contaminación. Por ello, desde 2008 existe un compromiso de reducción de emisiones del 20% para 2020. Para ese mismo año, también se ha fijado una mejora de la eficiencia energética y del consumo de energías renovables de un 20% [1]. Asimismo, se ha establecido que, para 2030, al menos el 27% del consumo de energía provenga de fuentes renovables. Con estas medidas se pretende disminuir en un 40% las emisiones de efecto invernadero, llegando a reducir dichos niveles en un 60% para 2040 respecto a las emisiones de 1990 [2]. Para ello, se ponen en marcha dos estrategias: el uso de biocarburantes de segunda y tercera generación para el transporte y el aumento de la eficiencia de los dispositivos que consumen energía.

Actualmente, se busca cumplir estos objetivos mediante el uso de fuentes de energía renovable. Los biocombustibles, producidos a partir de biomasa, como el metano, son una alternativa a los combustibles fósiles [3]. A los biocombustibles se les considera como fuente de energía renovable, dado que ayudan a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero.

En cualquier proceso de combustión el combustible y el oxidante son los dos elementos fundamentales. Por ello, en este estudio se pretende poder caracterizar la llama que este proceso genera para poder dar un mayor uso a los biocombustibles.

Este trabajo se engloba dentro de un proyecto más amplio llevado a cabo por el Departamento de Ingeniería Térmica y de Fluidos de la Universidad Carlos III de Madrid y financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad. Con este proyecto, se busca mejorar la eficiencia de los mecanismos de combustión, así como de dispositivos de energía portátil.

En concreto, el proyecto persigue como objetivo final la cuantificación, mediante el tratamiento adecuado de las imágenes, de los parámetros de combustión fundamentales asociados a la propagación de una llama de premezcla en una cámara de combustión que tiene lugar en los sistemas portátiles de generación de potencia, como pueden ser

micromotores, generadores eléctricos de potencia o módulos tanto de potencia intermitente como de potencia para vehículos aéreos. Sin embargo, este campo se encuentra dominado por las baterías actualmente.

Otro ámbito que se ve afectado por la propagación de llamas en microcanales es la seguridad frente a incendios. A la hora de que se produzca una fuga en un conducto, es importante que ésta no afecte al tanque o a otras zonas donde se pueda producir un incendio. Esto se puede impedir controlando la propagación de la mezcla por dichos conductos. Para ello, se genera una llama de premezcla en una cámara de combustión muy esbelta -siendo el espesor de la cámara mucho menor que el largo de la misma- en la cual la longitud menor es de 10 mm, lo que supone varias veces el espesor térmico de la llama que es de 0.1 mm. Dicha cámara emula el proceso de combustión que tiene lugar en los sistemas portátiles de generación de potencia, con el fin de analizar la influencia del tamaño de las cámaras de combustión a través del estudio de las inestabilidades que controlan dicha combustión. Es decir, en espacios tan reducidos, el aumento del área por unidad de volumen de los dispositivos modifica de forma significativa el proceso de combustión que se lleva a cabo en su interior. Esto se debe a que varía el balance térmico entre la producción y las pérdidas de calor.

La llama es la zona donde se produce la reacción de combustión entre el combustible y el comburente. Principalmente, existen dos tipos de llama en función del grado de mezclado del combustible con el aire: llamas de premezcla o de difusión. En estas últimas, el combustible y el comburente se mezclan justo en el momento de la combustión, por tanto, no existe mezcla previa. En las llamas de premezcla, caso de estudio de este trabajo, la combinación de los dos fluidos se realiza antes de alcanzar la cámara de combustión [4]. Si la cantidad de aire premezclado representa la total requerida en la combustión, se denomina llama de premezcla total. Por el contrario, si dicho aire sólo representa una fracción del requerido, se obtiene una llama de premezcla parcial.

1.1 Motivación

El crecimiento continuo de las energías renovables resalta la importancia de desarrollar nuevos dispositivos que ayuden a cumplir las especificaciones y acuerdos de la Unión Europea para poder mejorar la calidad de vida de las personas.

Hoy en día, como se ha comentado, el ámbito de la generación de potencia en sistemas portátiles se encuentra dominado por las baterías. Mediante este proyecto se busca poder colaborar en el desarrollo de dispositivos más sostenibles como micromotores. Sin embargo, éstos presentan bajos rendimientos, por ello, los micromotores no son una alternativa óptima ante las baterías. Por esta razón, es una tecnología que se encuentra en vías de desarrollo. No obstante, los micromotores ofrecen numerosas ventajas frente a las baterías como una mayor capacidad y facilidad de recarga, así como una significativa reducción del impacto medioambiental. Dicha disminución se debe a que pueden funcionar con biocombustibles que ayudan a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero.

A nivel más personal, el poder progresar en el ámbito de desarrollo de algoritmos, así como formar parte de un grupo de investigación y llevar a cabo el proyecto de forma experimental realizando ensayos en el laboratorio son puntos fundamentales en la motivación para realizar esta tesis. Asimismo, el entender cómo se gestiona un proyecto de investigación científica, aprendiendo a manejar las fases y los tiempos necesarios para realizar una tarea investigadora de calidad constituye otro de los aspectos más interesantes para llevar a cabo este trabajo.

1.2 Objetivos

Los objetivos principales del proyecto donde se engloba este trabajo son la cuantificación y análisis, mediante el tratamiento adecuado de las imágenes, de los parámetros de combustión fundamentales, así como de las inestabilidades que presenta la propagación de llamas de premezcla en una cámara de combustión que tiene lugar en los sistemas portátiles de generación de potencia.

En concreto, con esta tesis se pretenden desarrollar algoritmos y aplicaciones para el procesamiento, análisis y visualización de imágenes capturadas en los experimentos. Además, se busca contribuir a mejorar el entendimiento de los fenómenos físicos que controlan la combustión en cámaras muy esbeltas.

1.3 Marco regulador

El proceso que se estudia en esta tesis es la combustión interna, la cual está regulada a través de la normativa EURO [8]. El objetivo al que se ha comprometido

España es conseguir que para 2020 un 10% de la combustión interna esté producida por biocombustibles, además de intentar lograr que para ese mismo año haya aumentado en un 20% el consumo de energías renovables [1].

El aumento de la preocupación por la contaminación y el medioambiente en la sociedad en los últimos años ha provocado que en 2015 se firmase entre 195 países, entre los cuales se encuentra España, el Acuerdo de París. Este acuerdo establece un plan de acción mundial para frenar el calentamiento global y está enmarcado dentro de la convención de las Naciones Unidas sobre el cambio climático [9]. Asimismo, supone una continuación del protocolo de Kioto el cual está vigente hasta 2020 [10]. Uno de los objetivos principales de estas regulaciones es reducir las emisiones y aumentar la eficiencia de los procesos de combustión para así contribuir a mejorar el medioambiente.

Por otro lado, también existen regulaciones en el ámbito de la seguridad frente a incendios que afectan al presente estudio, además de las descritas en términos medioambientales [11]. Además, la propia universidad establece como imprescindible garantizar que el desarrollo de los experimentos se realice en condiciones adecuadas de seguridad y que se cumple con los procedimientos y normas de uso de laboratorios [12].

2. Estado del arte

El tema estudiado en este trabajo es muy novedoso y debido a ello existen pocas investigaciones previas en las que basar el proyecto.

Anteriormente, en la Universidad del Sur de California se realizaron experimentos similares en cámaras de combustión de pequeños espesores. Con ello pretendían estudiar el fenómeno de combustión del hidrógeno. Dichos experimentos se llevaron a cabo con hidrógeno debido a sus bajas emisiones de contaminantes con el objetivo de poder sustituir a los hidrocarburos en el futuro. Para ello, estudiaron la propagación de llamas de premezcla cuasi-2D de H_2 - O_2 -inerte, variando la riqueza de la mezcla, en una celda Hele-Shaw [13]. En estos estudios observaron diferentes inestabilidades presentes en la combustión del hidrógeno, identificando inestabilidades hidrodinámicas (Darrieus-Landau, Rayleigh-Taylor, Saffman-Taylor) e inestabilidades termo-difusivas (DT). También se percibió que las formas del frente de la llama y la propagación estaban fuertemente afectadas por los cuatro mecanismos de inestabilidad mencionados anteriormente. Sin embargo, en muchos casos las contribuciones de cada mecanismo fueron identificables y casi independientes entre sí.

Además, analizaron la propagación de llamas a bajos números de Lewis. Sin embargo, no obtuvieron los resultados que habían formulado en sus hipótesis. Es decir, se esperaba que para esos valores del número de Lewis y estando la cámara colocada verticalmente apareciesen círculos de llama análogos a las bolas de llama de las cámaras grandes, pero esto no sucedió en ninguno de los casos estudiados. En su lugar, observaron un patrón con forma irregular, ‘*sawtooth*’, que permanecía en su mayoría inalterado a lo largo de la propagación. Sin embargo, dicho patrón no era visible si la cámara se colocaba horizontalmente respecto al suelo [14].

Más tarde, en la Universidad Carlos III de Madrid se empezaron a realizar estos experimentos, pero con propano. No se usó hidrógeno debido a su alta volatilidad y sus riesgos ante fuga. La instalación contaba con una cámara de combustión de 51,5 cm de largo, 15 cm de ancho y pudiendo configurar el espesor de la misma para 13, 6 y 9 mm. A partir de esto, se procedió al cálculo de la velocidad de propagación para distintas mezclas, variando el dosado, para cada uno de los espesores. Con ello, se pretendía estudiar la influencia del espesor de la cámara en la velocidad de propagación. Sin embargo, no fue

posible analizar la evolución de las inestabilidades, dado que la cámara no podía grabar a más de 240 fps. Por tanto, sólo se pudo concluir que la longitud de la cámara de combustión era insuficiente para que el frente de llama alcanzara a propagarse a una velocidad estacionaria [15].

Posteriormente, mediante la realización de los experimentos con una cámara que grababa a 4000 fps, se consiguió comprobar que la velocidad media de propagación de la llama para los distintos valores del dosado sigue la misma tendencia que las llamas planas que se propagan por un medio no confinado. También se pudo verificar que, a diferencia de las llamas laminares planas que se propagan con una velocidad estacionaria, los frentes de llama estudiados siguen una distribución exponencial. Es decir, siguen acelerándose, lo que permite demostrar la existencia de sobrepresiones que ayudan o dificultan el avance de la llama. Sin embargo, estos resultados sólo se analizaron para el caso del propano en configuración abierto-abierto (OO) y cerrado-abierto (CO) [16].

3. Propagación de llamas de combustibles

A continuación, se va a proceder a presentar las ecuaciones que rigen de forma teórica los resultados experimentales que se expondrán más adelante. Para ello hay tres magnitudes que se han de conservar: masa, cantidad de movimiento y energía. Por tanto, dichas ecuaciones son las ecuaciones de Navier-Stokes.

- Ecuación de conservación de la masa

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{v}) = 0 \quad (3.1)$$

- Ecuación de conservación de la cantidad de movimiento

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{v}) + \nabla \cdot (\rho \bar{v} \bar{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot \bar{\tau}' + \rho \bar{f}_m \quad (3.2)$$

- Ecuación de la conservación de la energía

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[\rho \left(e + \frac{|\bar{v}|^2}{2} \right) \right] + \nabla \cdot \left[\rho \left(e + \frac{|\bar{v}|^2}{2} \right) \bar{v} \right] = -\nabla \cdot (p \bar{v}) + \nabla \cdot (\bar{v} \cdot \bar{\tau}') + \rho \bar{f}_m \cdot \bar{v} - \nabla \cdot \bar{q} + Q_r + Q_q \quad (3.3)$$

Sin embargo, la principal ecuación es la de la energía, por tanto, a continuación, se va a desarrollar dicha ecuación apoyándose en las otras dos anteriormente expuestas (3.1) y (3.2) [17].

3.1 Ecuación de la energía

La ecuación de la conservación de la energía expresada en su forma diferencial conservativa se corresponde con la ecuación (3.3) siendo:

e : la energía interna por unidad de masa

ρ : densidad del fluido

\bar{v} : vector de velocidad del fluido

$\bar{\tau}'$: tensor de esfuerzos viscosos

\bar{f}_m : fuerzas másicas

\vec{q} : flujo de calor (por unidad de superficie)

Q_r : calor debido a la radiación

Q_q : calor debido a reacciones químicas

Dicha expresión se puede reescribir en la forma simplificada:

$$\rho \frac{D}{Dt} \left(e + \frac{|\bar{v}|^2}{2} \right) = -\nabla \cdot (p\bar{v}) + \nabla \cdot (\bar{v} \cdot \bar{\tau}') + \rho \bar{f}_m \cdot \bar{v} - \nabla \cdot \vec{q} + Q_r + Q_q \quad (3.4)$$

A su vez, la ecuación de la energía también admite que se exprese en función de la entalpía, h , que se define:

$$h = e + \frac{p}{\rho} \quad (3.5)$$

Siendo p la presión y ρ la densidad del fluido. Entonces, para incluir esta expresión en la ecuación de la energía, es conveniente utilizar primero la ecuación de continuidad para obtener:

$$\nabla \cdot (p\bar{v}) = \rho \frac{D}{Dt} \left(\frac{p}{\rho} \right) - \frac{dp}{dt} \quad (3.6)$$

Por tanto, teniendo cuenta este resultado e incluyendo la expresión (3.5) en (3.4) suponiendo que no hay fuentes ni sumideros de calor por radiación ni por reacción química, la expresión (3.4) queda:

$$\rho \frac{D}{Dt} \left(h + \frac{|\bar{v}|^2}{2} \right) = \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{v} \cdot \bar{\tau}') + \rho \bar{f}_m \cdot \bar{v} - \nabla \cdot \vec{q} \quad (3.7)$$

Sin embargo, para saber qué términos contribuyen a producir una variación en $\frac{|\bar{v}|^2}{2}$ es necesario multiplicar escalarmente por \bar{v} la ecuación de cantidad de movimiento en su

forma convectiva, teniendo en cuenta que $\bar{v} \cdot [\bar{v} \wedge (\nabla \wedge \bar{v})] = 0$. Realizando dicha operación se obtiene:

$$\rho \frac{D}{Dt} \left(\frac{|\bar{v}|^2}{2} \right) = -\nabla \cdot (p\bar{v}) + \bar{v} \cdot (\nabla \cdot \bar{\tau}') + \rho \bar{v} \cdot \bar{f}_m \quad (3.8)$$

Entonces, combinando este resultado con la expresión (3.7):

$$\rho \frac{Dh}{Dt} = \frac{Dp}{Dt} + \phi_v - \nabla \cdot \vec{q} \quad (3.9)$$

A su vez, la entalpía se define mediante la siguiente expresión:

$$h = C_p T \quad (3.10)$$

Por tanto, introduciendo esta definición en la ecuación (3.9) considerando C_p constante, se obtiene:

$$\rho C_p \frac{DT}{Dt} = \frac{Dp}{Dt} + \phi_v - \nabla \cdot \vec{q} \quad (3.11)$$

Entonces, realizando un análisis a esta última expresión hallada se puede concluir que las variaciones de presión afectan a la temperatura. Es decir, un aumento de la presión conlleva un aumento de la temperatura, y una disminución de la presión tendría como resultado una disminución de la temperatura también.

Sin embargo, se va a considerar momentáneamente que las variaciones de presión son nulas para poder estudiar esta ecuación desde otros aspectos mediante el siguiente ejemplo unidimensional. Para ello, primero se va a particularizar la expresión (3.11) para coordenadas cartesianas en 2D (x,y), haciendo uso de la ley de Fourier $\vec{q} = -K\nabla T$ y considerando K y C_p constantes y las variaciones de presión nulas se halla:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \left(u_x \frac{\partial T}{\partial x} + u_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \mu \left(\left(\frac{\partial u_x}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_y}{\partial y} \right)^2 + \dots \right) + K \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (3.12)$$

En la combustión de llamas de premezcla en conductos estrechos los esfuerzos de fricción son muy pequeños. Por tanto, despreciando la disipación por esfuerzos viscosos y

despejando la derivada de la temperatura respecto al tiempo considerando que la temperatura sólo depende de la coordenada x (1D) y del tiempo, la anterior expresión queda:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{K}{\rho C_p} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right) - \left(u_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (3.13)$$

Finalmente, y dado que el término constante de la ecuación corresponde al coeficiente de difusión térmica, α , la expresión es:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right) - \left(u_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (3.14)$$

Por tanto, analizando esta última expresión se concluye que los términos convectivos, $u_x \frac{\partial T}{\partial x}$, desplazan a lo largo del espacio 'x' el perfil de temperatura con velocidad u_x . Por otro lado, los términos difusivos, $\alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right)$, son los encargados de homogeneizar el perfil de temperatura $T(x)$.

3.2 Ecuación de concentración de especies

Análogamente, el anterior desarrollo se puede realizar para la concentración en especies. Entonces, la ecuación de la energía expresada de forma general es:

$$\rho \frac{\partial Y_i}{\partial t} + \rho \vec{v} \cdot \nabla Y_i = \nabla \cdot (\rho D_i \nabla Y_i) + \Omega_q \quad (3.15)$$

Siendo:

Y_i : concentración de especies

ρ : densidad del fluido

\vec{v} : vector de velocidad del fluido

Ω_q : fuente (+) o sumidero (-) de especies

D_i : coeficiente difusivo de especies

Ahora, particularizando para coordenadas cartesianas en 2D (x,y), considerando D_i constante:

$$\rho \frac{\partial Y_i}{\partial t} + \rho \left(u_x \frac{\partial Y_i}{\partial x} + u_y \frac{\partial Y_i}{\partial y} \right) = \rho D_i \left(\left(\frac{\partial Y_i}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial Y_i}{\partial y} \right)^2 \right) + \Omega_q \quad (3.16)$$

Suponiendo que $Y_i = f(x, t)$ y que no hay sumideros ni fuentes de especies:

$$\frac{\partial Y_i}{\partial t} = D_i \left(\frac{\partial^2 Y_i}{\partial x^2} \right) - \left(u_x \frac{\partial Y_i}{\partial x} \right) \quad (3.17)$$

Por tanto, como ocurría en el caso del análisis de la evolución de la temperatura, en esta última expresión también se puede concluir que los términos convectivos, $u_x \frac{\partial Y_i}{\partial x}$, desplazan a lo largo del espacio 'x' el perfil de concentración de especies con velocidad u_x . Asimismo, los términos difusivos, $D_i \left(\frac{\partial^2 Y_i}{\partial x^2} \right)$, son los encargados de homogeneizar el perfil de concentración de especies.

3.3 Comparación difusión térmica vs difusión especies

Esta comparación se realiza mediante el número de Lewis, el cual es un número adimensional que se define a partir de la siguiente expresión:

$$Le = \frac{\alpha}{D_i} \quad (3.18)$$

Siendo:

α : coeficiente de difusión térmica

D_i : coeficiente difusivo de especies

A su vez, el coeficiente de difusión térmica se define a continuación:

$$\alpha = \frac{k}{\rho c_p} \quad (3.19)$$

Los valores típicos del número de Lewis para los combustibles usados son:

TABLA 3.1: VALORES TÍPICOS DE NÚMERO DE LEWIS

Combustible	Metano	Propano
Le	1.1	1.7

Sin embargo, como ya se ha comentado, dicho número varía con el coeficiente de difusión térmica y de especie. Es decir, el número de Lewis depende de la proporción de especies (aire y combustible) mezclado, es decir, del dosado. El dosado es el cociente entre la masa de combustible y la masa de aire presentes durante la combustión.

$$\phi = \frac{m_c}{m_a} \quad (3.20)$$

Por tanto, debido a las características de estos combustibles se concluye que para mezclas ricas (dosado > 1), el número de Lewis es mayor que la unidad para ambos, metano y propano.

3.4 Reacción química

Por otro lado, si existiera fuente o sumidero de especies, la forma más sencilla de expresarlo sería mediante Arrhenius:

$$\Omega_q = B \rho Y_1 Y_2 e^{\frac{-T_a}{T}}$$

Siendo:

B : factor preexponencial

ρ : densidad

Y_1 : concentración de la especie 1, aire

Y_2 : concentración de la especie 2, combustible

T_a : Temperatura de activación

T: Temperatura absoluta

Por tanto, analizando la fórmula, si la temperatura, T, es menor que la temperatura de activación, T_a , no existiría fuente o sumidero de especies, es decir, $\Omega_q = 0$. Su significado físico se puede explicar apoyándose en la Figura 3.1.

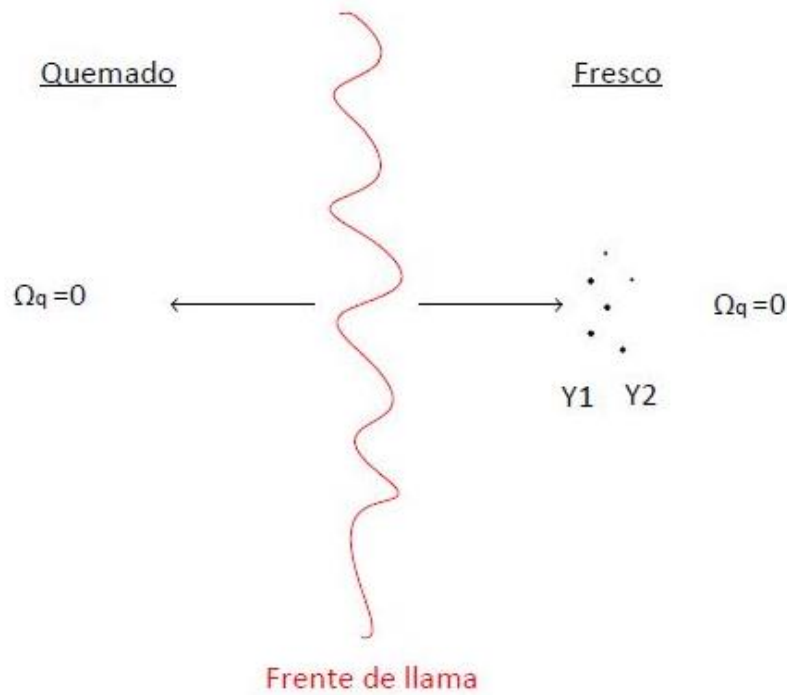


Figura 3.1: Esquema de las zonas respecto al frente de llama

En ambas zonas en las que se divide el esquema de la anterior imagen el sumidero o fuente de especies es nulo, pero por distintas razones.

- Quemado: en esta zona, aunque la temperatura es mayor que la temperatura de activación, la concentración de ambas especies es cero dado que ya ha sido quemado todo, por tanto, $\Omega_q = 0$.
- Fresco: la temperatura de esta zona es menor que la temperatura de activación dado que la llama aún no ha alcanzado dicha zona. Esto implica que, aunque exista concentración de ambas especies, $\Omega_q = 0$.

3.5 Inestabilidades

La propagación de llamas de premezcla en cuasi-2D con variación del número de Lewis, es decir, para diferente dosado, se analiza usando una celda Hele-Shaw. Dicha celda consiste en dos placas paralelas separadas por una distancia muy pequeña por la cual pasa el flujo. En estos estudios se observan varias inestabilidades, entre las que destacan las inestabilidades hidrodinámicas como las atribuidas a la expansión térmica del gas quemado (Darrieus-Landau), al contraste de viscosidad a través de la llama (Saffman-Taylor) y a la flotabilidad (Rayleigh-Taylor), y las inestabilidades termo-difusivas que son debidas a los propios efectos termo-difusivos.

3.5.1 Darrieus-Landau

El efecto Darrieus-Landau es una inestabilidad provocada por la expansión térmica del flujo y la consiguiente desviación en presencia de pequeñas perturbaciones de llama. Esto trae como consecuencia una aceleración o desaceleración del flujo local y una amplificación de la llama arrugada [18].

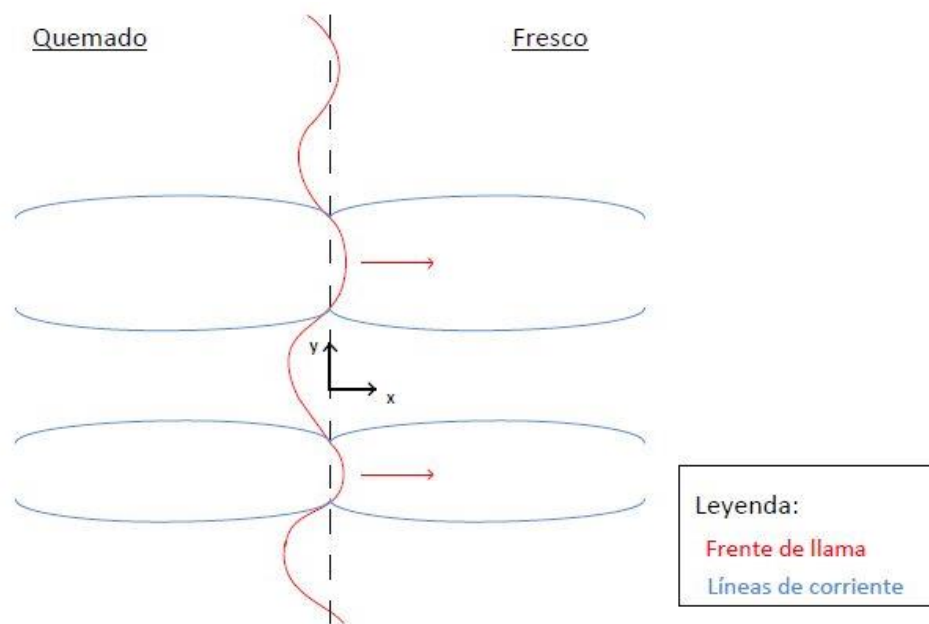


Figura 3.2: Esquema de la inestabilidad Darrieus-Landau

En la Figura 3.2, se puede observar como en las zonas más estrechas entre líneas de corriente, hay menos sección por lo que la velocidad es mayor y la arruga del frente de llama también. Por el contrario, en las zonas más anchas entre dos líneas de corriente, existe mayor área y, consecuentemente, menor velocidad y arruga.

3.5.2 Saffman-Taylor

Este efecto se debe a la formación de patrones en una interfase morfológicamente inestable entre dos fluidos en una célula de Hele-Shaw. Es decir, se debe a variaciones de la viscosidad a lo largo del frente de la llama. La inestabilidad de la interfaz entre ellos se debe a que uno de los fluidos, el menos viscoso de los dos, penetra en el más denso. Esto ocurre en las llamas dado que la viscosidad de los gases aumenta con la temperatura, por consiguiente, la viscosidad de los productos (quemados) es más alta que la de los reactivos (no quemados) [19].



Figura 3.3: Estructura de inestabilidad ST extraída de [38]

En la Figura 3.3 se muestra la estructura característica de esta inestabilidad dado que es difícil observarla de forma clara en el frente de llama.

3.5.3 Rayleigh-Taylor

El efecto Rayleigh-Taylor se debe a la inestabilidad de la interfaz entre ambos fluidos de distinta densidad. Es decir, la existencia de un gradiente de densidad producido por la acción de la gravedad, la variación de temperatura o por la modificación de la concentración (dosado de la mezcla) puede generar una distribución inestable de densidad y, por tanto, dar lugar al efecto Rayleigh-Taylor. Dicho efecto es una inestabilidad hidrodinámica que aparece cuando la presión es mayor sobre el fluido menos denso, por tanto, el gradiente de presión actúa sobre las variaciones de densidad. Consecuentemente, se produce una aceleración que es capaz de provocar turbulencia [21].

Sin embargo, este efecto cobra importancia en propagaciones de llama orientadas con la gravedad. Pero ese no es el caso de estudio, dado que la llama se propaga horizontalmente respecto al suelo por lo que la acción de la gravedad es la misma a lo largo del frente de llama.

3.5.4 Efectos termo-difusivos

La formación de la estructura celular en una llama está condicionada por los efectos de difusión y conducción del calor y es independiente de la hidrodinámica de la llama perturbada [22]. La difusividad térmica es la relación entre la conductividad térmica y la densidad y el calor específico a presión constante. El coeficiente de difusión térmica, α , mide la transferencia de calor del lado caliente al frío.

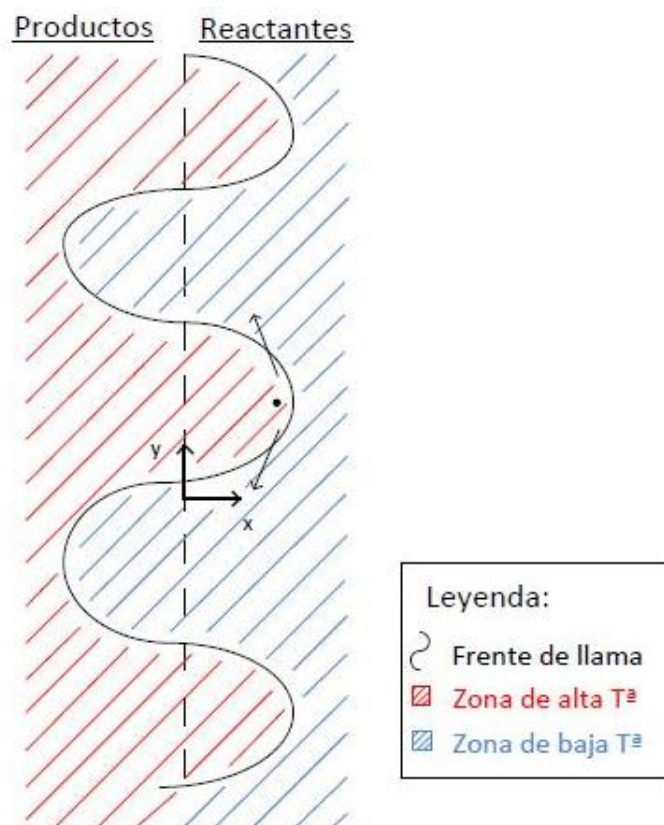


Figura 3.4: Esquema de los efectos Termo-difusivos

En la Figura 3.4 se puede observar que la zona caliente y, por tanto, de mayor temperatura es la correspondiente a los productos de la reacción de combustión, dado que en dicha zona ya ha pasado el frente de llama y, por tanto, ya se ha producido la combustión. Sin embargo, en la zona fría se encuentran los reactantes, dado que por esta

zona aún no ha pasado llama y, en consecuencia, no ha tenido lugar la reacción de combustión.

Si el número de Lewis es mayor que la unidad significa que se difunde más rápido la temperatura que la concentración de especies. Por tanto, analizando el punto señalado en la anterior imagen, la transferencia de calor del lado caliente al frío ocurre a mayor velocidad lo que conlleva que la arruga del frente de la llama se haga cada vez más ancha y, consecuentemente, dicho frente más plano.

Sin embargo, si el número de Lewis es menor que la unidad implica que se difunde más rápido la concentración de especies que la temperatura. Por tanto, haciendo un análisis del punto remarcado en la Figura 3.4, la transferencia de calor se produce de manera más lenta y, consecuentemente, la arruga se acentúa cada vez más haciendo que el frente de llama sea menos plano.

4. Configuración experimental

Para poder explicar la configuración experimental es necesario describir la instalación donde fueron realizados los experimentos en el laboratorio.

4.1 Descripción de la instalación del laboratorio

La instalación usada en el laboratorio para realizar estos experimentos está constituida por una cámara de combustión dentro de la cual se inyecta la premezcla y donde se encuentra situada la bujía de incandescencia. Dicha premezcla de aire y combustible es homogeneizada previamente gracias a su paso por el mezclador.

4.1.1 Cámara de combustión

Para la descripción de la cámara de combustión se puede dividir ésta en varias partes. La primera sería la base, función que es realizada por una placa de aluminio. Sobre ésta, se encuentra colocado un marco con forma de U que se fija mediante unos gatos para poder sellar el volumen interno. A su vez, sobre él, se pueden colocar tres tapas de espesor y material distintos para poder realizar algunos experimentos y así analizar las oscilaciones de la cámara. Dichas tapas son:

- Tapa de vidrio de 19 mm de espesor.
- Tapa de metacrilato de 19 mm de espesor.
- Tapa de metacrilato de 15 mm de espesor.

Por tanto, el volumen interno de la cámara, en general, es de 900x500x10 mm. Es decir, el espesor de dicho volumen es de 1 centímetro, aunque puede variar en función del espesor de la pieza usada como tapa de la cámara.



Figura 4.1: Perspectiva de la cámara de combustión.

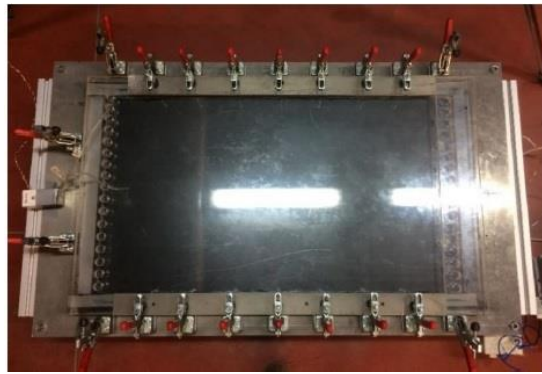


Figura 4.2: Planta de la cámara de combustión.

4.1.2 Bujía

La bujía empleada en la realización de los experimentos es una bujía incandescente, o también denominada de precalentamiento, de un coche Diesel. Este dispositivo es el encargado de provocar la ignición de la premezcla de aire y combustible. Su funcionamiento se basa en hacer pasar una corriente eléctrica que provoca que, debido a la resistencia eléctrica que tiene la bujía, ésta libere gran cantidad de calor por su punta donde se encuentra colocado un elemento calefactor.

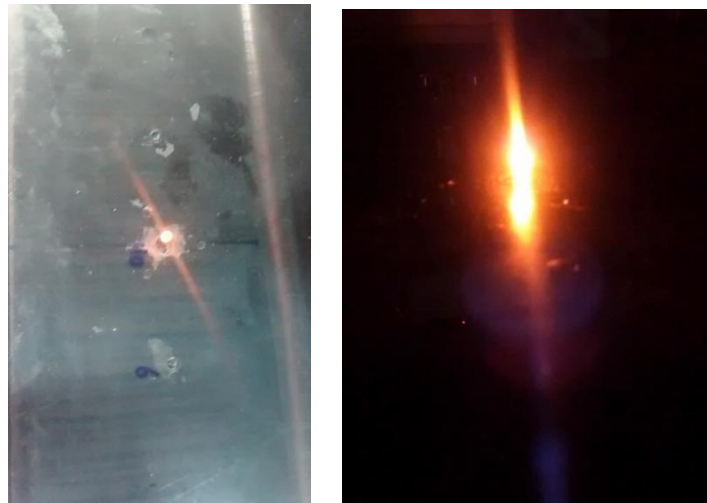


Figura 4.3: Bujía de la instalación

4.1.3 Controladores de aire y combustible

Para poder simular las diferentes relaciones de caudal de aire y combustible, es decir, de dosado de la mezcla, se ha utilizado un controlador de gasto másico para el aire y

otro para el combustible. Ambos controladores tienen como objetivo precisar el caudal de aire y de combustible, respectivamente, con el que se va a llenar la cámara de combustión.

El control del caudal de combustible se realiza a través de una aplicación instalada en el ordenador del laboratorio denominada *Smart Track 2*. Dicha aplicación permite regular la cantidad de combustible que se quiere introducir mediante el uso de una electroválvula de alta precisión.

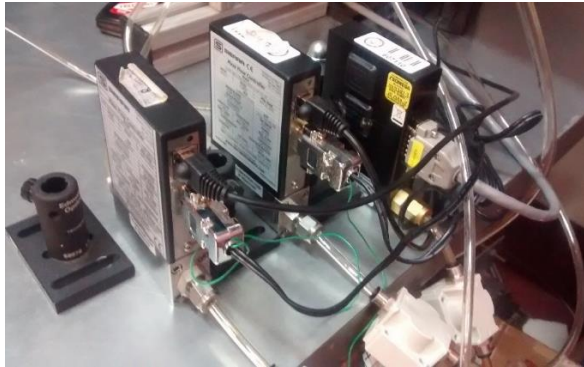


Figura 4.4: Controladores de gasto másico de aire y combustible

4.1.4 Mezclador

El mezclador es el dispositivo que tiene como función mezclar el caudal másico de combustible y de aire proveniente de los dos controladores. Esta mezcla se realiza antes de la inyección en la cámara de combustión dado que lo que se pretende analizar en este proyecto son llamas de premezcla.

Asimismo, la inyección de la premezcla en la cámara de combustión se realiza mediante cuatro inyectores que están situados a lo largo de la línea en la que se encuentra la bujía. Con esta disposición de los inyectores se pretende distribuir la premezcla por toda la cámara de combustión de manera homogénea.

4.1.5 Cámara de vídeo de alta velocidad

Cada experimento realizado en el laboratorio, para poder ser analizado posteriormente, ha sido grabado mediante la cámara de vídeo de alta velocidad *Memrecam HX-3*. Dicha cámara se coloca, con la ayuda de un trípode, en posición perpendicular a la planta de la cámara de combustión. En algunos casos, para poder estudiar el espesor de la

llama, la cámara de alta velocidad es colocada formando un ángulo muy pequeño con dicho espesor.



Figura 4.5: Cámara de alta velocidad

4.1.6 Acelerómetro

Para poder estudiar las oscilaciones que sufre la llama en su propagación a lo largo de la cámara de combustión y su relación con las oscilaciones que sufre la tapa superior de ésta, se ha usado el acelerómetro *Model JTF* de la marca *Honeywell*. Este acelerómetro cuenta con las siguientes especificaciones:

TABLA 4.1: ESPECIFICACIONES DEL ACELERÓMETRO EXTRAÍDO DE [26]

<i>Range Code</i>	<i>Available ranges</i> (<i>peak G</i>)	<i>Sensitivity nominal</i>	<i>Sensitivity range</i>	<i>Usable frequency range</i>	<i>Mounted resonant frequency</i>
<i>GN</i>	$\pm 50\text{ G}$	0.8 mV/G	$[0.5\text{ } 1.2]\text{ mV/G}$	$[0\text{ } 1000]\text{ Hz}$	2000 Hz

Este acelerómetro se coloca adherido a la tapa superior de la cámara de combustión para que pueda capturar la señal que produce las oscilaciones durante el experimento. A su vez, también se encuentra conectado a un osciloscopio para poder recoger dicha señal en un dispositivo de almacenaje para su posterior estudio.

4.2 Desarrollo experimental

Una vez descritos los dispositivos para la realización de los experimentos, en el esquema que se muestra a continuación queda reflejado la disposición que tienen sobre la cámara de combustión.

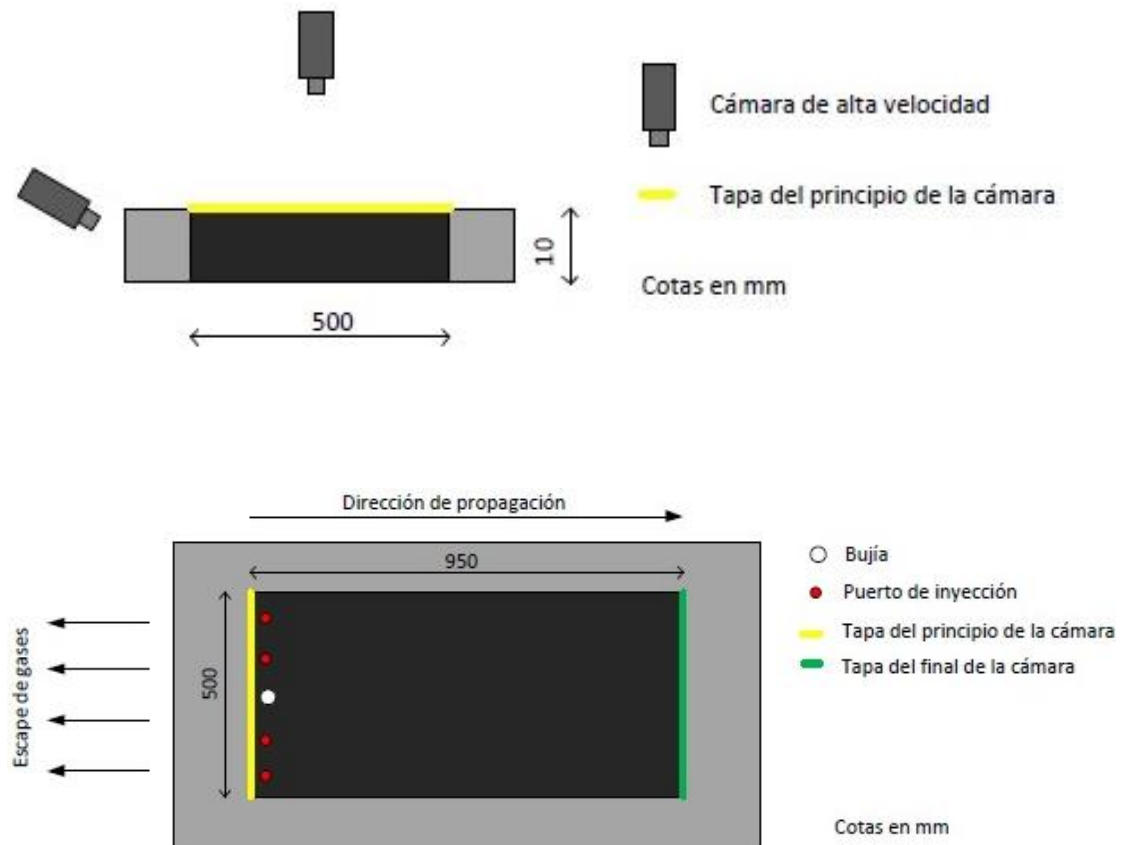


Figura 4.6: Esquema de la perspectiva y planta de la cámara de combustión.

La propagación de la llamada ocurre de izquierda a derecha según se mira el esquema de la planta de la cámara de combustión en la Figura 4.6. Por consiguiente, la bujía está colocada a la izquierda en la mitad del ancho de la cámara y en su misma línea los cuatro puertos de inyección. Además, el prototipo fue diseñado de tal forma que los laterales de menor longitud de la cámara pueden ser tapados o no para simular las distintas configuraciones. En concreto, el escape de gases señalado en la Figura 4.6 se correspondería con la configuración abierto-cerrado (OC). Las posibles configuraciones son:

- Cerrado-abierto (CO): hace referencia a la configuración en la que el lateral de la cámara donde se encuentra la bujía (tapa del principio de la cámara) se encuentra tapado, y su opuesto abierto (tapa del final de la cámara).
- Abierto-abierto (OO): ambos laterales se encuentran abiertos.
- Abierto-cerrado (OC): el lateral cercano a la bujía está abierto y su opuesto cerrado.
- Cerrado-cerrado (CC): ambos laterales se encuentran cerrados. Sin embargo, esta configuración no ha sido realizada en el laboratorio por peligro de explosión.

Los experimentos se realizan en la cámara de combustión descrita anteriormente cuyo espesor es del orden del espesor térmico de llama. La cámara de combustión es el lugar donde se produce la combustión del combustible gaseoso con el comburente, en este caso aire. La cantidad de combustible y comburente se ajusta en cada experimento en función del dosado que se desee, realizando la mezcla de ambos previamente a su introducción en la cámara. El dosado hace referencia a la riqueza (dosado > 1 , exceso de combustible) o pobreza (dosado < 1 , defecto de combustible) de la mezcla, siendo el dosado estequiométrico (es decir, dosado $= 1$) la relación entre masa de combustible y masa de aire que hace que en la reacción de combustión no sobre ni aire ni combustible. Asimismo, los combustibles gaseosos usados son metano y propano.

4.2.1 Protocolo

Para poder realizar los experimentos se necesita de una preparación muy rigurosa de todos los elementos que te intervienen en los mismos. Los pasos para llevar a cabo este proceso son los siguientes:

1. Se activa el mando del manómetro de presión de aire de la instalación para que ésta deje de ser cero.

2. Se enciende y se coloca la cámara de alta velocidad en la posición deseada para la captura del experimento. Además, se prepara en el ordenador el programa informático el cual permite visualizar y guardar los archivos que graba la cámara.
3. Se encienden los controladores de gasto másico del aire y del combustible y se fija la cantidad de éstos. Es decir, se fija el dosado al que se quiere realizar el experimento mediante la aplicación informática *Smart Track 2*.
4. Se ajusta el tiempo de ignición -tiempo que depende del dosado y del combustible elegido- para que se encienda la bujía. Este tiempo de ignición se ve incrementado al aumentar el dosado.
5. Se selecciona la configuración de la cámara de combustión que se desea simular en el experimento y el combustible gaseoso que se va a usar: metano o propano. Entonces, se abre la llave del depósito de dicho combustible.
6. Se procede a la carga de la premezcla en la cámara de combustión. Para ello, se tapa el lateral de la cámara donde se encuentra la bujía para que los gases que se encontraran dentro de la cámara antes de la carga sean expulsados por el lado opuesto a la posición de los puertos de inyección.
7. Una vez tapado dicho lateral, se abre la válvula que une los conductos que provienen de los controladores y se pone en modo “Automatic” la aplicación *Smart Track 2*. De esta manera, se permite que mediante los cuatro inyectores se llene la cámara de combustión, proceso que dura aproximadamente 2 minutos.
8. Tras el llenado, se cierra la válvula y se pone en modo “Closed” el programa informático *Smart Track 2*.

9. Por último, se lleva a cabo el experimento. Para ello, se dispone la configuración del experimento seleccionada tapando o destapando los laterales de la cámara que dicha configuración exija. Esto se realiza a la vez que se enciende la bujía y se apaga las luces del laboratorio.

Es muy importante que a la hora de hacer el experimento las luces del laboratorio estén apagadas para minimizar el ruido que pueda quedar reflejado en la imagen. También cabe destacar la importancia y dificultad que tiene la coordinación de la toma de medidas, dado que se necesita activar la cámara, encender la bujía y grabar en un proceso de propagación que dura décimas de segundo.

Una vez se ha realizado el experimento, se visualiza en el ordenador y se exportan los archivos de la cámara a un dispositivo de almacenaje para su posterior estudio.

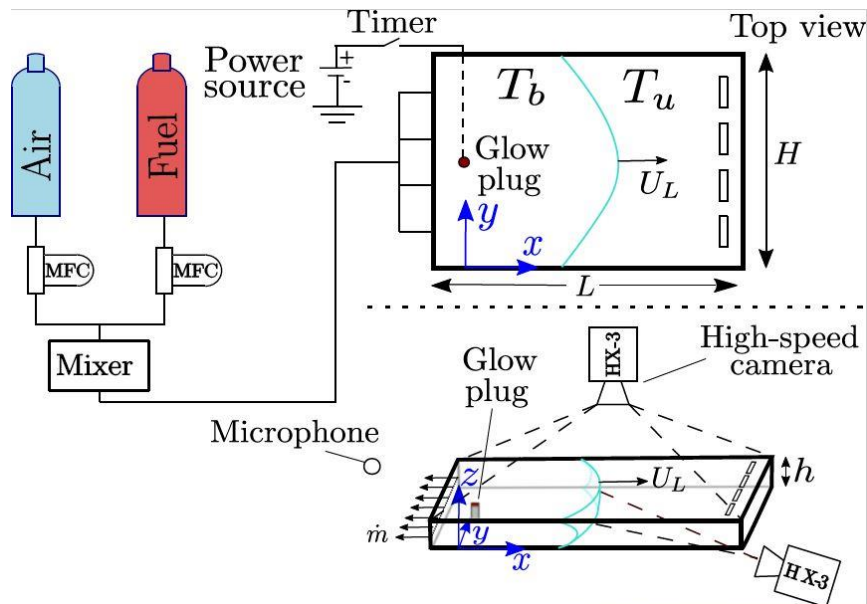


Figura 4.7: Esquema de la instalación del laboratorio extraído de [27]

5. Análisis de imagen

Una vez se ha capturado con la cámara de alta velocidad el experimento realizado en el laboratorio se procede al análisis de las imágenes generadas. Para ello, se hace uso de dos programas: *Image-J* y *Matlab*. El objetivo del tratamiento de imágenes es filtrar las imágenes para poder conseguir detectar el contorno del frente de llama de forma automática para así, posteriormente, poder calcular el área de la cámara de combustión que ha sido quemada por la llama a su paso en cada instante. Asimismo, se busca ser capaz de caracterizar la velocidad con la que avanza la llama, intentando explicar los picos o irregularidades observadas en la misma. Para ello, es necesario poder determinar la posición de dicho frente de llama en función del tiempo.

Sin embargo, para alcanzar estos objetivos en este capítulo se va a explicar cómo se preparan las imágenes hasta su detección del frente de llama para poder después desarrollar los algoritmos de cálculo correspondientes. Por tanto, lo que se pretende es localizar puntos luminosos, es decir, puntos de alta intensidad en comparación con el resto de la imagen. Para ello, se somete a las imágenes a un proceso de limpieza, para poder así eliminar el exceso de motas de polvo, reflejos o condensación que derivan de la complejidad de los perfiles o de las condiciones en las que han sido llevados a cabo los experimentos.

5.1 Image-J

Image-J es un programa de código abierto mediante el cual se limpia el ruido que ha podido quedar reflejado en las imágenes del experimento. Asimismo, se elimina la bujía dado que no es relevante y dificulta la posterior detección del contorno de la llama. En función del experimento en concreto que se esté estudiando puede ser necesario modificar los niveles de contraste y brillo para una mejor visualización de la propagación de la llama. Por ejemplo, las imágenes de los experimentos realizados con metano tienen un menor nivel de intensidad que en los casos en los que se ha usado propano. Esto se debe a que el poder calorífico del metano (74.8 kJ/mol) [28] es menor que el del propano (103.8 kJ/mol) [29].

Asimismo, es muy importante trabajar en aspectos como el umbral, que define qué nivel de blancos y negros es el deseado. Independientemente de haber sido modificado o no dichos niveles, se vuelven a revisar en *Matlab*.

A continuación, se muestra un ejemplo de la transformación que se realiza mediante el uso de este programa:

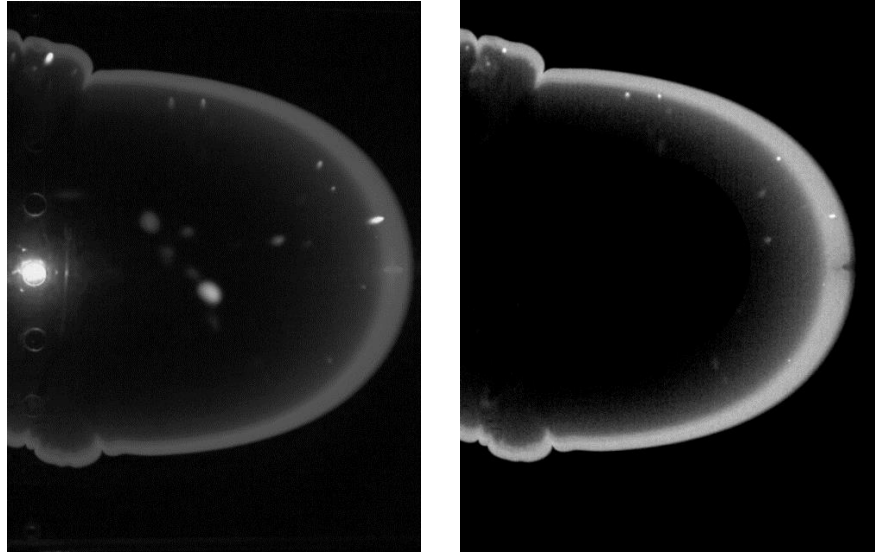


Figura 5.1: A la izq., imagen original; a la derecha, imagen procesada en *Image-J*.

5.2 Matlab

Después de haber sido tratadas las imágenes en *Image-J*, se someten a otro proceso, teniendo en cuenta de nuevo el nivel de umbral deseado de blancos y negros, con el objetivo de conseguir unos mejores resultados. A continuación, se binariza el conjunto de imágenes del experimento para facilitar la detección del contorno. Es decir, se transforma la matriz de píxeles que conforman cada imagen en una matriz de 1 y 0. Dicha transformación se realiza en función del nivel de blanco y negro de cada pixel, haciendo referencia el 1 a blanco y 0 a negro. Para ello, se define un umbral a partir del cual por encima de ese valor se considera un pixel como blanco y por debajo del mismo como negro.

Tras la binarización, se termina de completar el proceso de eliminación de ruido y zonas quemadas. Después, en función de la complejidad del frente de llama del experimento en concreto que se esté analizando, se procede de distintas formas a la obtención de la posición y velocidad de determinados puntos y del contorno de la llama que se explicarán más adelante. Esto permitirá obtener posteriormente el porcentaje de área

quemada en cada instante, el número y tamaño de celdas del frente de llama y estudiar el origen de las inestabilidades que se observan en el laboratorio.

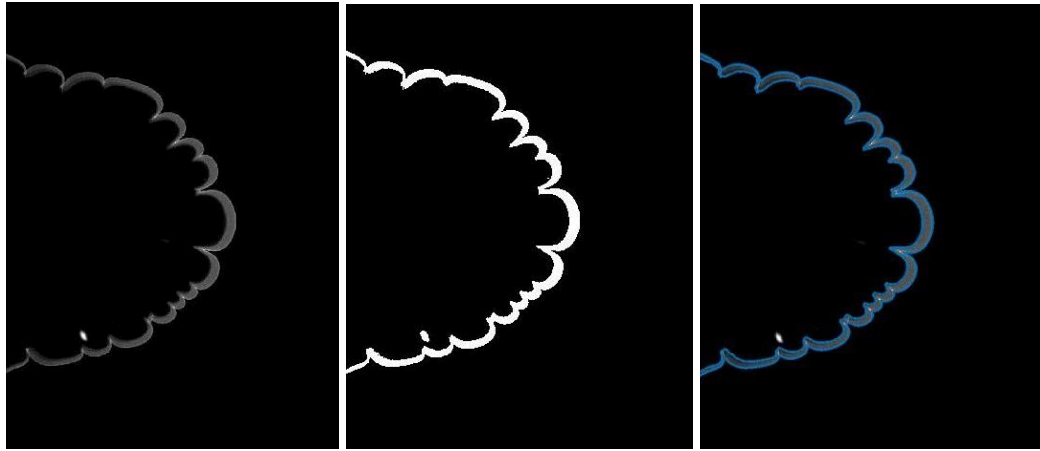


Figura 5.2: Proceso completo de detección del frente de llama. [color online]

En la Figura 5.2, se muestra en primer lugar la imagen de un instante de tiempo concreto de un experimento después de haber sido eliminado el ruido, motas de polvo y zonas quemadas, mediante el uso tanto de Image-J como de Matlab. En segundo lugar, se muestra dicha imagen binarizada. Por último, se observa en la tercera imagen el contorno del frente de llama.

A la hora de comenzar la realización del código para el tratamiento de imágenes en el programa Matlab, se parte de las imágenes generadas en experimentos con el frente de llama bastante plano dado que son más sencillas de analizar. Esto se debe a que la ausencia de celdas en el frente de la llama permite detectar el contorno de la misma de una manera más simple. De igual modo, se parte de este tipo de experimentos para iniciarse en el manejo del programa *Image-J*. Un ejemplo de ello es la imagen que se muestra a continuación (Figura 5.3).

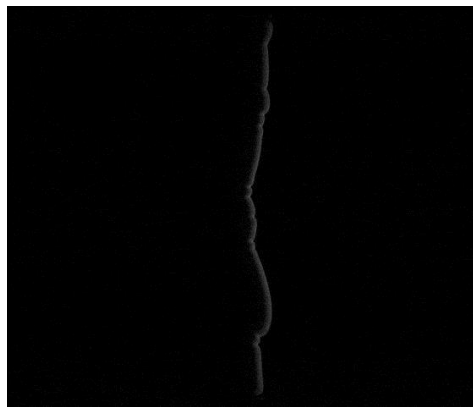


Figura 5.3: Imagen de un frente de llama plano.

Tras haber tratado las imágenes generadas por este tipo de experimentos en Image-J, realizado el código para la detección del contorno del frente de llama en Matlab y estudiado brevemente sus inestabilidades, se procede a analizar imágenes más complejas (Figura 5.4) en las cuales la propagación de la llama genera celdas.

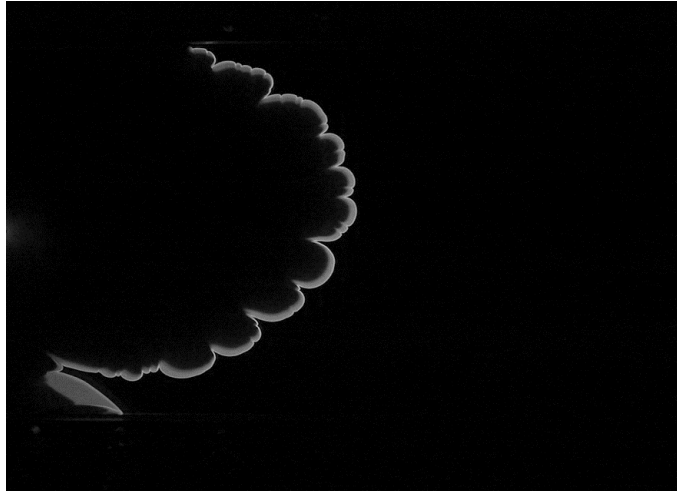


Figura 5.4: Imagen de un frente de llama con celdas.

6.Desarrollo de los algoritmos

Los algoritmos para el tratamiento de imagen y cálculo de los parámetros deseados han sido desarrollados en *Matlab*.

En este proyecto carece de importancia el color de la imagen ya que el objetivo es encontrar puntos de alta intensidad en comparación con el resto de los puntos de la imagen, teniendo en cuenta que antes de la ignición era una imagen completamente oscura. Por ello, se procede a grabar los experimentos en escala de grises directamente.

Asimismo, *Matlab* trata las imágenes como si fueran matrices. Al ser éstas capturadas en escala de grises, *Matlab* convierte cada imagen en una matriz (m, n), cuyas dimensiones hacen referencia a la resolución a la que han sido tomadas dichas imágenes. Es decir, la dimensión ‘m’ indica el número de píxeles que tiene la imagen a lo largo – horizontalmente- y la dimensión ‘n’ se corresponde con el número de píxeles de la imagen a lo ancho – verticalmente.

6.1 Lectura de imágenes

Este paso se realiza de dos formas diferentes dependiendo de si se quiere analizar una imagen sólo o el conjunto de imágenes completo del experimento.

En el caso de analizar solamente una imagen, la lectura de la misma en *Matlab* se realiza mediante la función ‘*imread*’ que proporciona una matriz de la imagen de clase uint8, lo que significa que la escala de intensidades de grises va desde 0 a 255 siendo 0 negro absoluto y 255 blanco puro.

Por otro lado, si se quiere analizar el conjunto de imágenes de un experimento, primero ha de leerse la dirección de la carpeta donde se encuentra guardado dicho conjunto y guardar en una variable mediante la función ‘*dir*’ todas esas imágenes. Sin embargo, esta función proporciona una variable de tipo struct de dimensiones (m, 1), siendo ‘m’ el número de imágenes grabadas del experimento. Por tanto, es necesario usar la función ‘*imread*’ implementada dentro de un bucle para leer todas las imágenes y obtener una matriz de tipo uint8 para cada una de ellas.

6.2 Tratamiento de imagen

A continuación, se va a explicar el código programado para lograr el objetivo del capítulo 4.2.

El proceso de limpieza en *Matlab* se realiza mediante la función de filtrado medio '*medfilt2*'. Este filtrado es una operación no lineal que se usa a menudo en el procesamiento de imágenes para reducir el ruido. Un filtro medio es bastante efectivo cuando el objetivo es reducir simultáneamente el ruido y preservar los bordes como es este caso.

A través de la función '*imbinarize*' la matriz de la imagen se binariza convirtiéndola en una matriz lógica (de 0 y 1). Esta función establece un límite a partir del cual cada pixel de la imagen se convierte en negro (0) o blanco (1) puro únicamente. Por defecto, *Matlab* fija dicho límite en 0.5, por tanto, si un pixel tiene intensidad mayor a ese valor en escala de grises, dicho pixel se convierte en blanco, representado con un 1 en la matriz lógica de dimensiones (m, n). En cambio, si el valor de intensidad es menor que este límite, ese punto de la imagen pasa a ser negro, es decir, un 0 en la matriz lógica. Sin embargo, el valor del umbral predefinido por *Matlab* no se ajusta bien a las imágenes a analizar, por ello, es necesario definir un límite o umbral que se encuentra en torno al 0.1 pudiendo variar en función del experimento que se analice.

6.3 Detección del frente de llama

La detección del frente de llama inicialmente se realiza mediante la función '*find*' haciendo que busque en la matriz de la imagen el valor '1'. Es decir, esta función, haciendo uso de la matriz lógica, lleva a cabo la búsqueda de coordenadas del contorno de frente de llama mediante un bucle. En él, se examina fila a fila la matriz de derecha a izquierda con el objetivo de encontrar la primera posición de cada fila que toma valor 1 (es decir, blanco). A continuación, se guardan dichas posiciones en dos vectores X e Y para su posterior análisis.

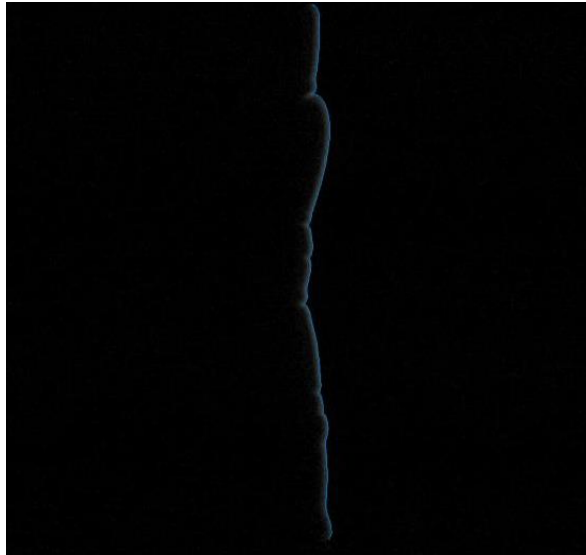


Figura 6.1: Imagen del frente de llama detectado de un perfil plano.

Sin embargo, debido al método usado, en muchos casos no es posible obtener únicamente el frente de llama, sino que se detecta el contorno entero de la llama. Por ello, este algoritmo no es demasiado eficiente ni siquiera para experimentos con frente plano, y más si se tiene en cuenta que la mayoría de los experimentos presentan un frente de llama más complejo.

Por tanto, se desarrolla otro método para la detección del frente de llama. Para ello, se procede a la detección del contorno del mismo. En este proceso se parte de la imagen binarizada. Mediante la función *'bwboundaries'* se detecta un contorno cerrado, es decir, el frente de llama delantero y la parte de detrás del mismo como se muestra en la siguiente imagen (Figura 6.2).

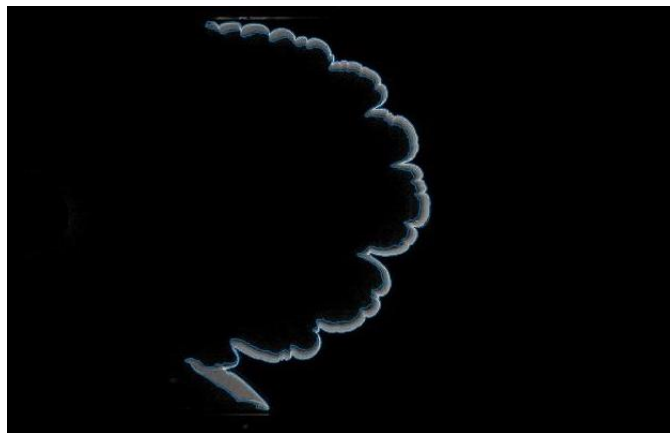


Figura 6.2: Imagen del contorno de un frente de llama con celdas.

Sin embargo, lo que se pretende detectar es sólo el frente de llama. Para ello, se ha desarrollado un método basado en escala de grises, dado que el gradiente en la escala de grises es mucho mayor en el lado de frente de llama que en el área que deja tras de sí la llama, y rectas paralelas y perpendiculares. En este método se parte de la imagen tratada, pero sin ser binarizada, por eso, su matriz toma valores de 0 a 255. Su esquema se muestra en la Figura 6.3, siendo el punto A el punto de estudio.

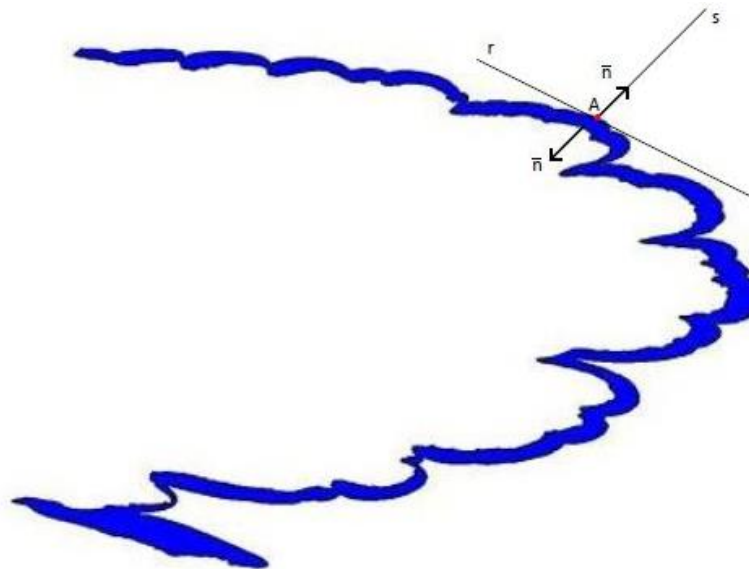


Figura 6.3: Esquema del método para la detección del frente de llama.

Dicho método consiste en analizar cada punto del contorno detectado de la siguiente manera:

- Se define un valor de intensidad límite en la escala de grises el cual determina si ese punto se considera que pertenece al frente de llama o, por el contrario, forma parte del área que va dejando a su paso la llama.
- Se construye una recta que pase por el punto anterior y posterior del contorno detectado del punto que se está estudiando. A dicha recta se le denomina recta 'r'.
- Además, se construye una recta 's' perpendicular a la recta 'r' y que pase por el punto de estudio.
- Se hallan los puntos contiguos al punto a analizar en la recta 's'. Para ello, se calcula la distancia entre dos puntos del contorno (el de estudio y el punto posterior

a éste). A partir de la forma genérica de la recta 's' y de la ecuación de circunferencia de radio igual a la distancia calculada entre dos puntos, se hallan los puntos contiguos al punto a analizar en la recta 's'.

- Se calcula la intensidad en la escala de grises de dichos puntos contiguos y se compara con el valor límite: si la diferencia de intensidad entre esos dos puntos es mayor que el valor límite, el punto analizado pertenece al frente de llama. En cambio, si es menor que dicho límite, el punto estudiado no interesa.
- Por último, se reordenan los puntos que finalmente pertenecen al frente de llama para graficarlos de manera correcta.

Consideraciones que hay que tener en cuenta en la aplicación de este método:

- Si la recta 'r' es una recta horizontal (su pendiente es igual a cero), por tanto, la recta 's' sería una recta vertical con pendiente infinita. Pero en *Matlab* no se puede trabajar con infinitos. Sin embargo, se sabe que, si la recta 'r' es horizontal, los puntos contiguos que buscamos son los inmediatamente superior e inferior, respectivamente, en la vertical al punto que se está analizando. De esta manera, no se trabaja con infinitos.
- La implementación de este algoritmo en *Matlab* se realiza mediante un bucle. Por ello, el primer y último punto del contorno detectado por la función '*bwboundaries*' se analizan fuera de este bucle. Esto se debe a que, si se introdujeran dentro del bucle, al buscar el punto anterior y posterior al punto de análisis se excederían las dimensiones de la matriz de contorno.

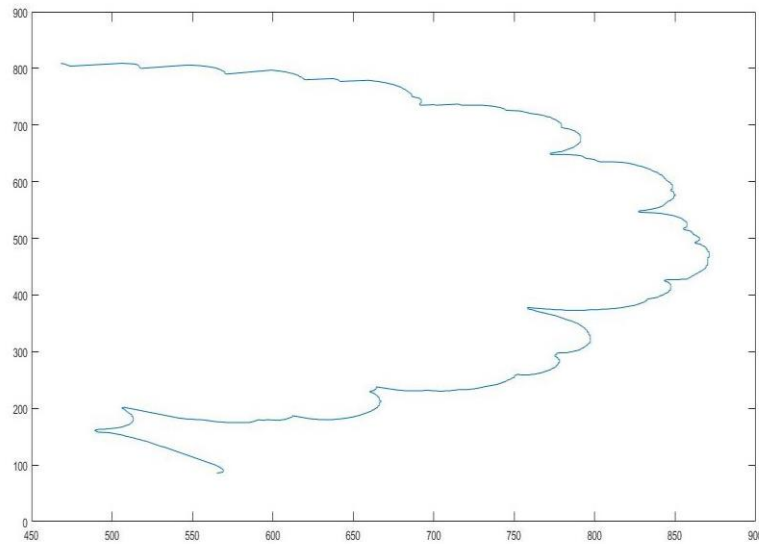


Figura 6.4: Frente de llama detectado mediante el uso de este proceso.



Figura 6.5: Frente de llama detectado sobre la imagen original del experimento.

6.4 Cálculo del porcentaje de área quemada

Para calcular el porcentaje de área quemada es necesario hallar el área quemada en cada instante de tiempo mediante el uso de la función *'polyarea'*. Esta función calcula el área del polígono especificado por los vectores *x* e *y*. Dichos vectores hacen referencia a las coordenadas '*x*' e '*y*' de cada punto del frente de llama detectado.

Por otro lado, se calcula el área total que se corresponde con el área total de la cámara de combustión. Por ello, se halla multiplicando las dimensiones de la matriz de cualquier de las imágenes de un experimento.

$$\text{Área total} = m \cdot n \quad (6.1)$$

Sin embargo, las unidades tanto del área quemada hallada con la función '*polyarea*' como del área total son píxel al cuadrado. Por ello, es necesario la conversión a m^2 . Para ello, se calcula el número de píxeles que tiene el ancho de la cámara de combustión en cualquier imagen capturada obteniendo 754 píxeles. Ese valor corresponde con 0.5 metros que es la medida real del ancho de la cámara. Por tanto, ya se tiene un factor de conversión de píxel a metro.

$$\text{Factor de conversión} = \frac{0.5}{754} \left[\frac{\text{m}}{\text{pixel}} \right] \quad (6.2)$$

Una vez se ha obtenido el área quemada y el área total, mediante la siguiente expresión se calcula el porcentaje de área quemada.

$$\% \text{ área quemada} = \frac{\text{Área quemada}}{\text{Área total}} \cdot 100 [\%] \quad (6.3)$$

6.5 Cálculo del ritmo de quemado

El ritmo de quemado se halla como la derivada del área quemada en cada instante respecto al tiempo multiplicada por la inversa del área total de la cámara de combustión, por ello, se denomina como $\frac{1}{A_t} \frac{\partial A}{\partial t}$. Su cálculo se realiza mediante diferencias finitas de distinto tipo dependiendo si se calcula la derivada del área respecto al tiempo para la primera imagen del experimento, la última o para imágenes intermedias.

- Diferencias finitas progresivas: se aplica para el cálculo del ritmo de quemado de la primera imagen.

$$\frac{1}{A_t} \frac{\partial A}{\partial t}(1) = \frac{1}{A_t} \left(\frac{A(2) - A(1)}{t(2) - t(1)} \right) \quad (6.4)$$

- Diferencias finitas centradas: se aplica para el cálculo de este parámetro para las imágenes intermedias.

$$\frac{1}{A_t} \frac{\partial A}{\partial t}(j) = \frac{1}{A_t} \left(\frac{A(j+1) - A(j-1)}{t(j+1) - t(j-1)} \right) \quad (6.5)$$

- Diferencias finitas regresivas: se aplica a la última imagen del experimento.

$$\frac{1}{A_t} \frac{\partial A}{\partial t}(N) = \frac{1}{A_t} \left(\frac{A(N) - A(N-1)}{t(N) - t(N-1)} \right) \quad (6.6)$$

Siendo:

$A(j)$: área quemada para el instante de tiempo j .

$t(j)$: valor del tiempo en el instante j .

Sin embargo, en ocasiones la imagen no abarca toda la cámara de combustión, sino que captura el primer tercio de la cámara para poder observar de forma más clara lo que ocurre inicialmente en el experimento. Por ello, para realizar comparativas entre distintos experimentos se va a usar la velocidad media de propagación $\frac{1}{H} \frac{\partial A}{\partial t}$, siendo H el ancho de la cámara de combustión. El cálculo de este parámetro se realiza mediante el mismo proceso que para el ritmo de quemado, pero multiplicando por la inversa del ancho de la cámara. De esta manera, ya no depende del área total sino del ancho que es igual para todos los casos estudiados.

6.6 Cálculo del número de celdas

El cálculo del número de celdas del frente de llama en cada instante de tiempo se realiza a partir del análisis de la curvatura que presenta la llama.

Por tanto, una vez detectado el perfil del frente de la llama, se realiza un suavizado mediante la aplicación de la función '*smooth*' debido a que al hacer 'zoom' se observa un perfil muy brusco en algunos puntos lo que puede llevar a obtener resultados erróneos.

Para calcular la curvatura del perfil, es necesario hallar el vector longitud del contorno mediante la siguiente expresión.

$$s(i) = s(i-1) + \sqrt{(x(i) - x(i-1))^2 + (y(i) - y(i-1))^2} \quad (6.7)$$

$$\text{con } s(1) = 0$$

Siendo:

s : longitud del contorno

x : coordenada x del frente de llama detectado

y : coordenada y del frente de llama detectado

i : posición de cada punto dentro de los vectores, es decir, $i = 1, 2, \dots, N$ siendo N la longitud de los vectores x e y del perfil del frente de llama.

La curvatura (k) se puede hallar como la inversa del radio de curvatura, por ello, su cálculo atiende a la siguiente ecuación.

$$k = \frac{\frac{dx}{ds} \frac{d^2y}{ds^2} - \frac{dy}{ds} \frac{d^2x}{ds^2}}{\left(\left(\frac{dx}{ds} \right)^2 + \left(\frac{dy}{ds} \right)^2 \right)^{\frac{3}{2}}} \quad (6.8)$$

Entonces, si el valor de la curvatura supera cierto límite impuesto, el cual es ajustado para cada experimento pero que se encuentra para todos los casos en torno al 0.2, se considera una celda. Después, mediante un contador se va sumando el número de celdas encontrado para cada instante de tiempo.

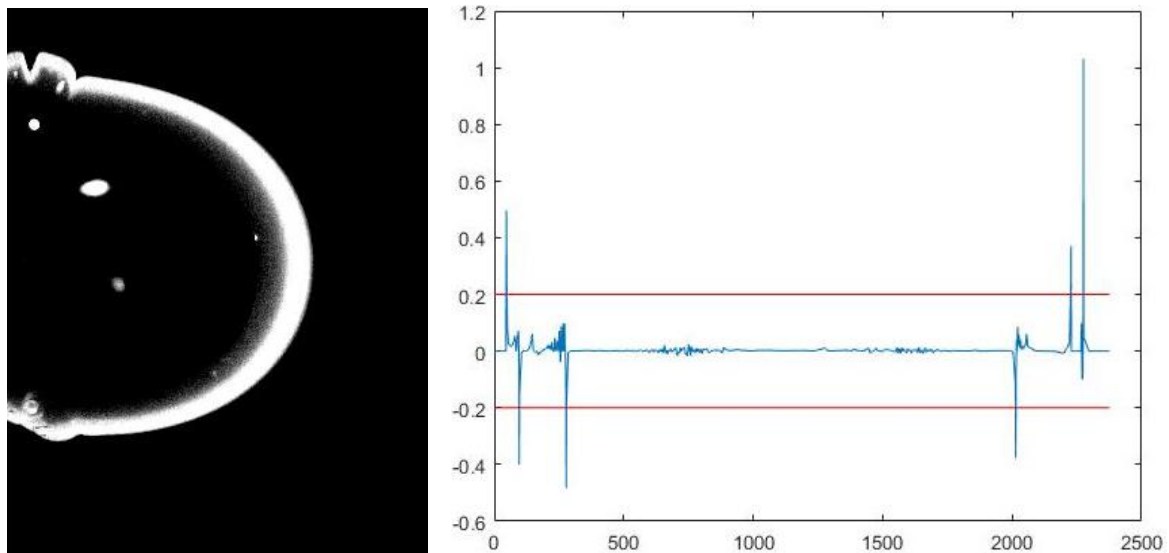


Figura 6.6: Comparación entre número de celdas visibles y calculadas.

En la Figura 6.6, a la izquierda se muestra la imagen del experimento en la cual se pueden contabilizar 6 celdas. A la izquierda, se representa la curvatura a lo largo de la longitud del contorno del frente de la llama. En esta gráfica, se puede observar como 6 picos superan el valor límite representado por las líneas rojas (tanto en negativo como en positivo debido a que la curvatura puede tomar valores positivos y negativos). Por tanto, coincide el número de celdas visibles en el frente de llama con el calculado mediante el algoritmo.

6.7 Cálculo de la velocidad instantánea

La velocidad instantánea se calcula mediante la derivada de la posición respecto del tiempo, dado que se conoce la posición del frente de llama en cada instante de tiempo. Para este método, se establecen tres puntos fijos, y a lo largo de esos puntos se evalúa la evolución de la llama. Estos tres puntos son: el punto medio, un cuarto y tres cuartos del ancho de la cámara de combustión. Por tanto, se crean tres nuevos vectores con la posición a lo largo del experimento de cada uno de esos tres puntos. La derivada de cada uno de estos vectores respecto del tiempo permite conocer la velocidad instantánea del frente de llama.

El principal inconveniente de este método es la falta de exactitud que puede llevar a obtener resultados erróneos. Esto se debe a que, a lo largo del recorrido de la llama por la cámara de combustión, los lóbulos de ésta crecen, decrecen o se agrupan formando celdas más grandes. Por tanto, la posición de estos puntos variaría llegando incluso a retrasarse

debido a la desaparición del lóbulo donde se encontraban. Sin embargo, esto no quiere decir que la llama se retrase ni se corresponde con las oscilaciones que sufre la propia llama.

Además, la llama no siempre avanza más rápido por su parte central y más lento por los laterales. Por ello, podría llegar al final de la cámara de combustión por uno de los puntos que no sean los tres fijados ni un punto que esté lo suficientemente cerca de éstos como para que les afecte y el método diseñado no lo detectaría, dado que solamente se fija en el avance de los tres puntos prefijados.

Por estas razones, no se va a presentar como resultado a analizar la velocidad instantánea. Sin embargo, se podría aumentar la precisión con más puntos y realizando una media.

6.8 Acelerómetro

Asimismo, mediante el uso del programa *Matlab* también se pretende estudiar las oscilaciones que se observan en la llama en el recorrido que hace a lo largo de la cámara de combustión y de dónde proviene dichas oscilaciones: si la tapa de la cámara de combustión al vibrar provoca esas oscilaciones en la llama, o la propia presión que sufre la llama al avanzar a lo largo de la cámara puede ser la causante de dichas oscilaciones las cuales hacen que vibre la tapa.

El objetivo de este código es determinar la función que sigue las oscilaciones detectadas en la llama durante la realización del experimento. Para ello, se usa el acelerómetro anteriormente descrito conectado a un osciloscopio. De esta manera, el osciloscopio proporciona un archivo Excel con una columna de tiempos y otra de voltaje de la señal que ha recogido el acelerómetro durante el experimento. Sin embargo, la señal que interesa para el análisis es aceleración frente al tiempo, por ello, es necesario realizar una curva de calibración.

6.8.1 Curva de calibración

Para obtener esta curva, hay que conseguir los datos de voltaje que se corresponden con +g y -g, siendo g la gravedad igual a $9.8 \text{ [m/s}^2\text{]}$. Dichos datos se hallan colocando el acelerómetro en su posición, es decir, sobre la tapa superior de la cámara de combustión,

pero sin que se realice ningún experimento en el interior de ésta. Entonces, situando el acelerómetro en su posición habitual se obtiene los datos para +g e invirtiéndolo para -g. Lo que se espera obtener es un valor constante de voltaje para +g y otro para -g. Sin embargo, debido a los errores propios de obtener datos de forma experimental no se alcanza siempre exactamente el mismo valor, por lo que se hace una media de los datos obtenidos para cada caso.

TABLA 6.1: VALORES DE CALIBRACIÓN

	+g	-g
Valor medio voltaje	-0.0159 V	-0.2809 V

Una vez hallados estos valores, se puede representar la curva de calibración dado que se tienen dos puntos de dicha curva.

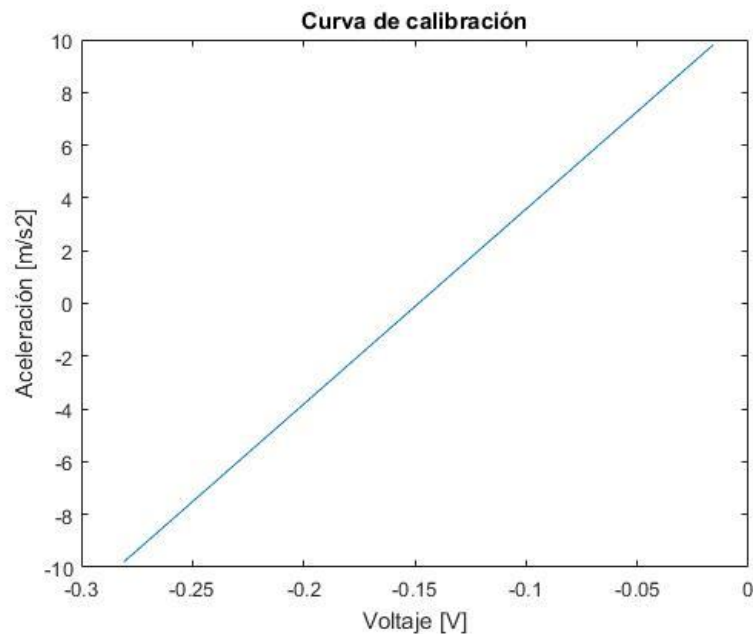


Figura 6.7: Curva de calibración del acelerómetro.

El coeficiente de conversión de voltaje a aceleración para este acelerómetro es la pendiente de la curva de calibración que se calcula mediante la siguiente expresión (ecuación (6.9)).

$$C_{conv} = m = \frac{+g - (-g)}{C_{+g} - C_{-g}} \quad (6.9)$$

Siendo:

C_{conv} : coeficiente de conversión voltaje-aceleración [$m/(s^2V)$]

m : pendiente de la curva de calibración [$m/(s^2V)$]

$+g$: valor positivo de la gravedad, es decir, $+9.8 [m/s^2]$

$-g$: valor negativo de la gravedad, es decir, $-9.8 [m/s^2]$

C_{+g} : valor constante en voltios para $+g$, es decir, $-0.0159 [V]$

C_{-g} : valor constante en voltios para $-g$, es decir, $-0.2809 [V]$

Por tanto, introduciendo estos datos en la anterior expresión se obtiene el valor de conversión.

$$C_{conv} = 73.9771 \frac{m}{s^2V} \quad (6.10)$$

6.8.2 Cálculo del aceleración y velocidad

Una vez se ha obtenido el valor de conversión de voltaje a aceleración, resulta trivial calcular los valores de aceleración: se extrae del archivo *Excel* los datos de relativos al voltaje y se multiplican por el factor de conversión. Asimismo, la otra columna de valores del archivo *Excel* proporciona los datos de tiempo. Entonces, integrando la aceleración respecto al tiempo considerando la velocidad en el instante inicial igual a cero, es decir, $V(0) = 0$, se halla la velocidad.

7. Resultados y análisis

En este capítulo se van a presentar los resultados obtenidos y se va a realizar un análisis detallado de los mismo basándose en diferentes puntos: tipo de configuración, tipo de combustible, dosado de la mezcla y material de la tapa superior de la cámara de combustión. Para cada uno de los puntos anteriores, excepto en material de la tapa, se ha obtenido el porcentaje de área quemada frente al tiempo, el ritmo de quemado y número de celdas y su tamaño. Cada uno de los experimentos ha sido analizado hasta el punto en el que la llama está demasiado perturbada y no es posible continuar con su estudio.

7.1 Tipo de configuración

Los tipos de configuración estudiados, que dependen del sentido de propagación de la llama, son la configuración cerrado-abierto (CO) y abierto-cerrado (OC). Para poder comparar los datos obtenidos de ambas configuraciones, se han mantenido fijos el resto de los parámetros. Es decir, en ambos casos se ha utilizado el mismo combustible (metano), el mismo dosado (dosado estequiométrico) y el mismo material de la tapa superior de la cámara (vidrio) de espesor 19 mm.

7.1.1 Configuración cerrado-abierto

La configuración cerrado-abierto, denominada con las siglas CO (Closed-Open), hace referencia al tipo de configuración donde el lado donde se encuentra la bujía incandescente está cerrado y su opuesto abierto. Por esto, se produce el efecto pistón que es debido a las sobrepresiones generadas en el área que ya ha sido quemada y que, por tanto, ayudan a avanzar a la llama en su desplazamiento a lo largo de la cámara. Por ello, en este caso, se esperan alcanzar las mayores velocidades de quemado.

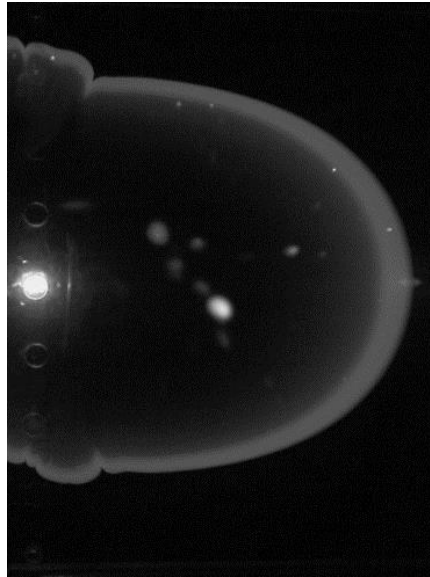


Figura 7.1: Frente de llama en la config. CO de metano con dosado 1 en $t=0.008s$.

Los resultados obtenidos para esta configuración son:

- Porcentaje de área quemada frente al tiempo.

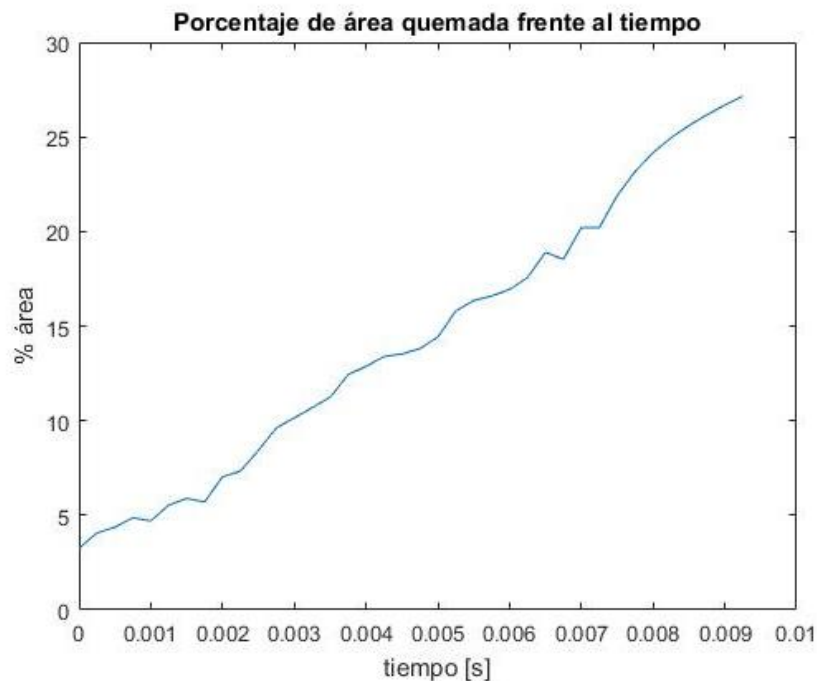


Figura 7.2: Porcentaje de área quemada en la config. CO de metano con dosado 1.

En la Figura 7.2, se observa como el porcentaje de área quemada va creciendo según avanza la llama a lo largo de la cámara de combustión. Asimismo, también se observa que para $t = 0$, el porcentaje de área quemada es aproximadamente un 4% dado

que hace referencia al área quemada en el momento siguiente a que se haya encendido la bujía de incandescencia. Por otro lado, el porcentaje máximo de área no alcanza el 100 % debido a que en este experimento se grabó aproximadamente un tercio de la cámara para poder observar con mayor precisión los fenómenos que ocurren al inicio. Como se muestra en la Figura 7.1, el perfil se caracteriza por un lóbulo o celda mucho mayor al resto que se mantiene prácticamente durante todo el experimento. Por tanto, aun cuando la zona más avanzada del frente de llama se ha salido de los dominios de captura de la cámara de alta velocidad y, por tanto, ya no se puede detectar el perfil de la llama, sigue existiendo una separación entre la llama y el lateral de la cámara de combustión, lo que hace que el porcentaje de área quemada no alcance el tercio de área total.

- Ritmo de quemado

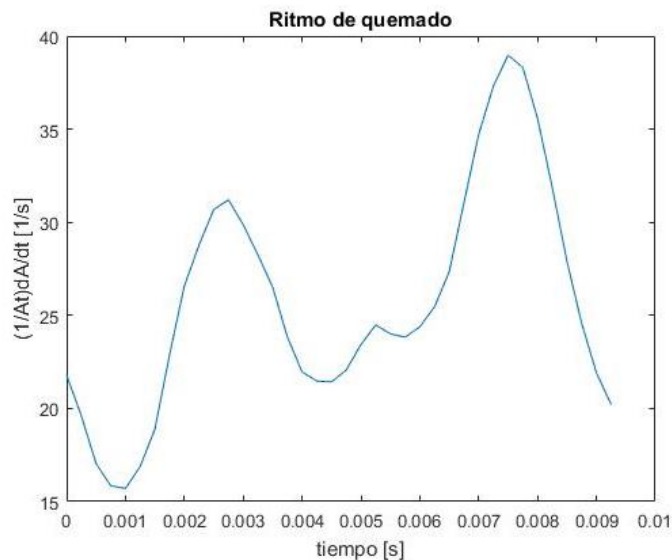


Figura 7.3: Ritmo de quemado en la configuración CO de metano con dosado 1.

En la anterior imagen (Figura 7.3) se ha representado el ritmo de quemado de este tipo de configuración para metano con dosado estequiométrico frente al tiempo. Como se puede observar no se refleja un crecimiento continuado frente al tiempo como ocurría con el área quemada, sino que dicho ritmo sufre fluctuaciones según avanza la llama por la cámara de combustión. Esto se debe a las propias oscilaciones que sufre la llama a lo largo del experimento. Estas fluctuaciones son muy marcadas debido al bajo número de imágenes capturadas a causa de la alta velocidad a la que viaja la llama.

- Número de celdas frente al tiempo

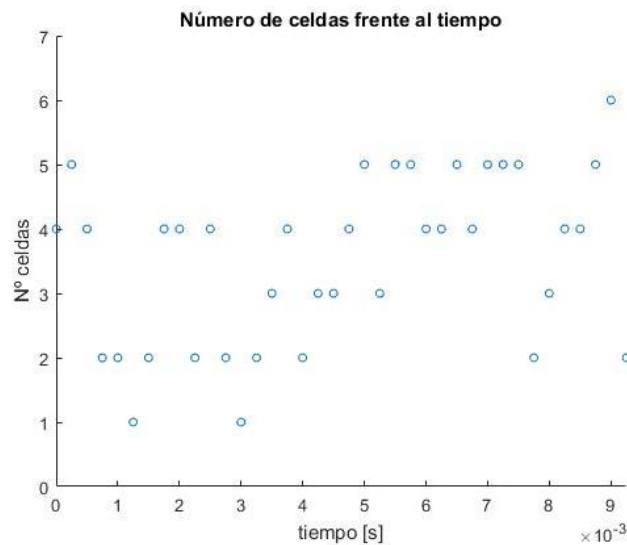


Figura 7.4: Número de celdas en la configuración CO de metano con dosado 1.

La Figura 7.4 muestra en el número de celdas, también denominadas lóbulos, en cada instante de tiempo. Analizando dicha figura, se puede concluir el mínimo y el máximo número de celdas, siendo 1 y 7 respectivamente. Por consiguiente, que el número mínimo de celdas sea igual a 1 confirma que en este tipo de experimentos se mantiene una celda mucho mayor que el resto, llegando incluso en ciertos instantes de tiempo a existir únicamente dicha celda.

7.1.2 Configuración abierto-cerrado

La configuración abierto-cerrado que se corresponde con las siglas OC (Open-Closed) es la configuración inversa a la CO. Es decir, es aquella en la que el lado de la cámara de combustión donde se localiza la bujía está abierto y su extremo opuesto cerrado. Por tanto, la llama se propaga hacia el extremo cerrado donde aumenta la presión progresivamente (acoplamiento acústico).

A continuación, se muestra una imagen del frente de llama característico de esta configuración para metano con dosado estequiométrico (Figura 7.5). En ella, se puede observar como desaparece ese lóbulo dominante que presentaba el perfil de llama de la configuración CO.

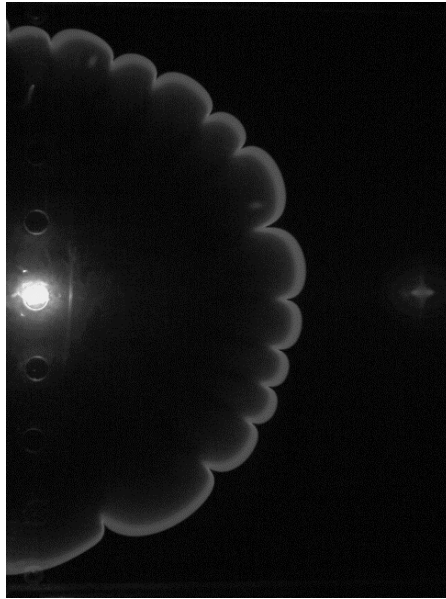


Figura 7.5: Frente de llama en la config. OC de metano con dosado 1 en $t=0.05s$.

Sin embargo, este tipo de perfiles se van desarrollando a lo largo del experimento hasta convertirse en un perfil mucho más plano (Figura 7.6) debido a la configuración de la cámara de combustión.

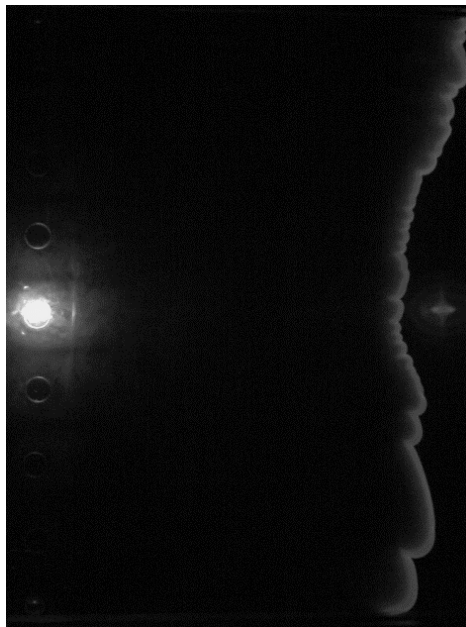


Figura 7.6: Frente de llama en la config. OC de metano con dosado 1 en $t=0.08s$.

Los resultados obtenidos para esta configuración son:

- Porcentaje de área quemada frente al tiempo.

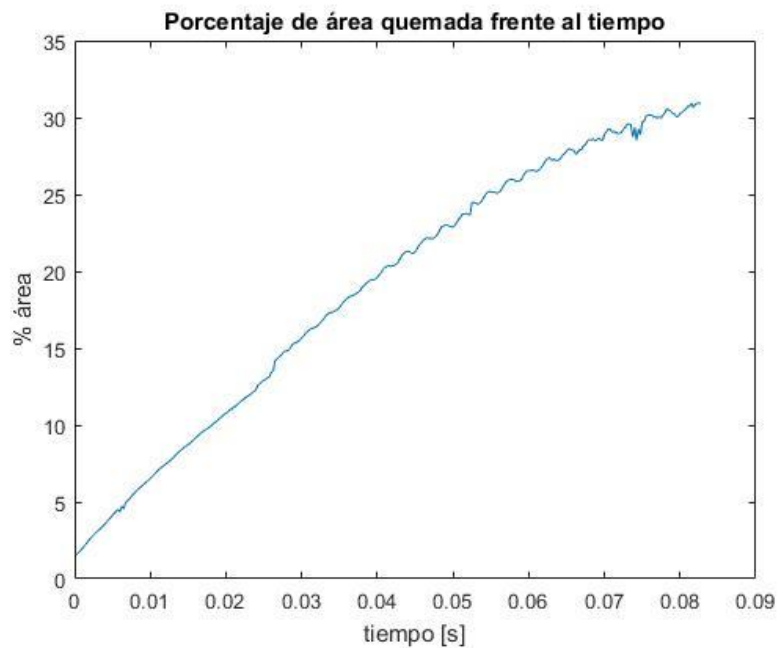


Figura 7.7: Porcentaje de área quemada en la config. OC de metano con dosado 1.

En la Figura 7.7 se representa el porcentaje de área quemada en cada instante de tiempo para este tipo de configuración. En dicha imagen, se puede percibir que el porcentaje de área quemada aumenta conforme la llama avanza a través de la cámara de combustión. Sin embargo, se aprecia también que a partir de cierto instante de tiempo la curva sufre fluctuaciones. Esto se debe a las sobrepresiones que aparecen debido a que la llama avanza hacia el extremo cerrado y a que el perfil poco a poco abandona la forma ‘semicircular’ que tiene en la Figura 7.5 para convertirse en un perfil prácticamente ‘plano’ (Figura 7.6).

Asimismo, se puede apreciar que este experimento también fue grabado a un tercio del total de la cámara de combustión. Sin embargo, y debido a que adopta un perfil más plano, si se alcanza el 33% de área quemada al final de las imágenes capturadas.

- Ritmo de quemado

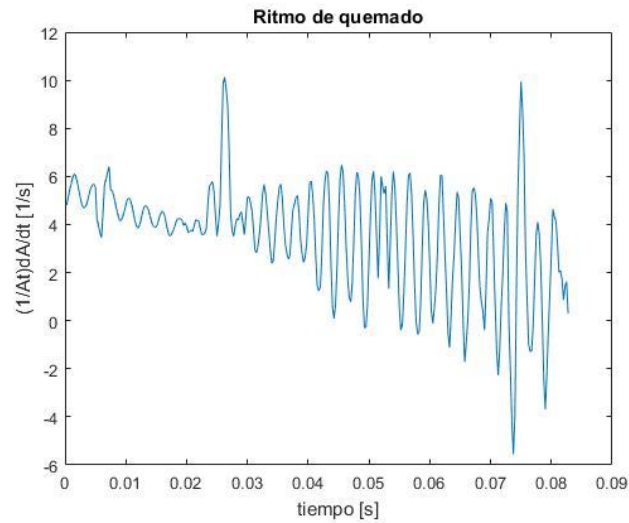


Figura 7.8: Ritmo de quemado en la configuración OC de metano con dosado 1,

En la Figura 7.8 se ha graficado el ritmo de quemado para este tipo de configuración. Analizando la imagen, se observa que al inicio el ritmo de quemado sufre pequeñas fluctuaciones las cuales se van acentuando poco a poco. Sin embargo, y coincidiendo con el punto a partir del cual el porcentaje de área quemada empieza a fluctuar, el ritmo de quemado también sufre variaciones abruptas debido a las sobrepresiones que se generan al avanzar hacia zonas de mayor presión.

- Número de celdas frente al tiempo

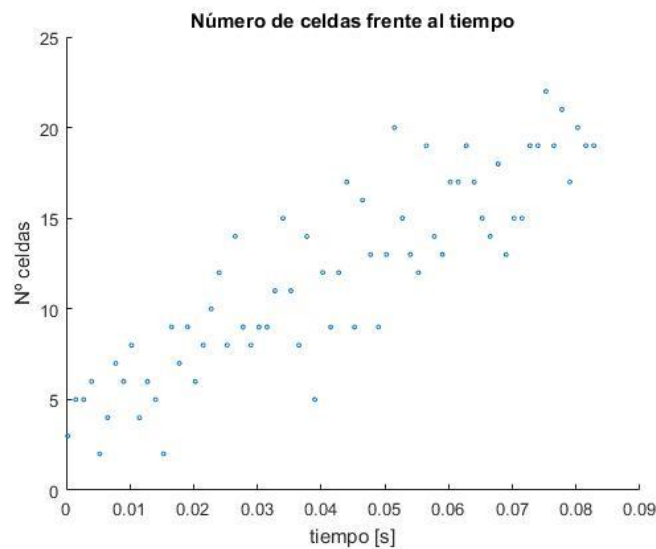


Figura 7.9: Número de celdas en la configuración OC de metano con dosado 1.

En la anterior imagen (Figura 7.9) se ha representado el número de celdas para cada instante de tiempo. Analizando los resultados, y a diferencia de la evolución que sufría este parámetro en la configuración CO, en este caso se observa que el número de lóbulos va creciendo a medida que la llama avanza y se va perturbando. Después, una vez el frente de la llama ya se encuentra más plano, el número de celdas es bastante similar para los distintos tiempos, siendo aproximadamente dicho número 19.

7.1.3 Comparación entre ambas configuraciones

En este apartado se va a proceder a realizar una comparación de los distintos parámetros de las dos configuraciones estudiadas. Para ello, en la Figura 7.10 se muestra los porcentajes de área quemada de ambos casos para facilitar su análisis.

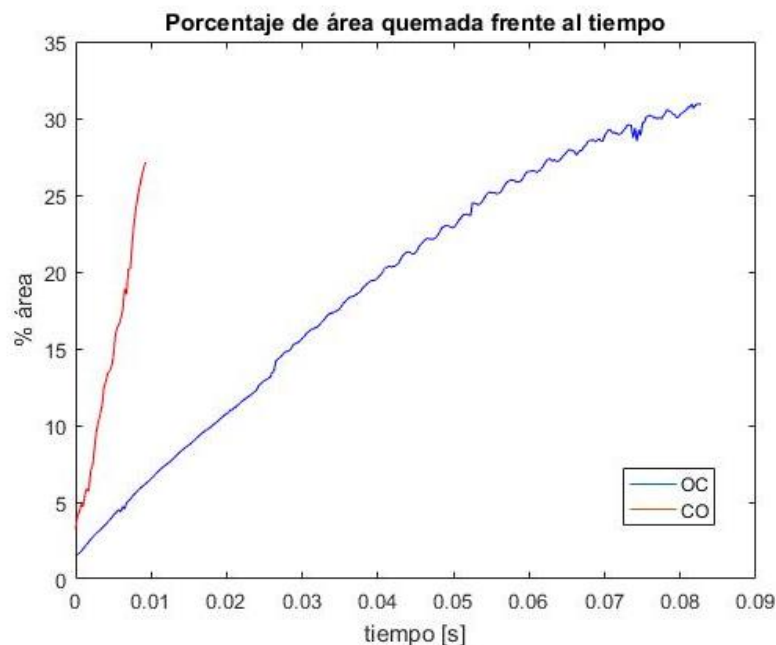


Figura 7.10: Comparación porcentaje de área para distintas configuraciones.

En primer lugar, analizando la anterior gráfica (Figura 7.10) se observa que la escala de tiempos para la configuración cerrado-abierto es casi 10 veces inferior a dicha escala para la configuración abierto-cerrado. Es decir, el tiempo que tarda la llama en la configuración CO en quemar el 5 % del área de la cámara es aproximadamente 0.001 segundos. En cambio, este tiempo se multiplica por 10 en el caso de la configuración OC. Esto implica que, en el caso de la configuración CO, la llama quema área de forma más rápida, es decir, que avanza a una mayor velocidad. Esto se debe a que en el caso en el que la cámara de combustión se encuentra en abierto-cerrado, para poder avanzar la llama ha

de vencer las sobrepresiones que se generan a causa del aumento de presión progresivo y, por ello, recorre la cámara a menor velocidad. Sin embargo, en el caso de la configuración cerrado-abierto la llama avanza en dirección al extremo de la cámara que está abierto. Por tanto, las sobrepresiones ayudan a la llama a avanzar provocando el efecto pistón. En consecuencia, la velocidad a la que se traslada la llama es mayor y el tiempo que tarda en recorrer la cámara es menor. Además, al empujar a la llama el efecto pistón uniformiza el frente haciéndolo más plano (Figura 7.6).

Asimismo, para examinar el ritmo de quemado sin que dependa del área total, se va a realizar a partir de la velocidad media de propagación que se muestra a continuación.

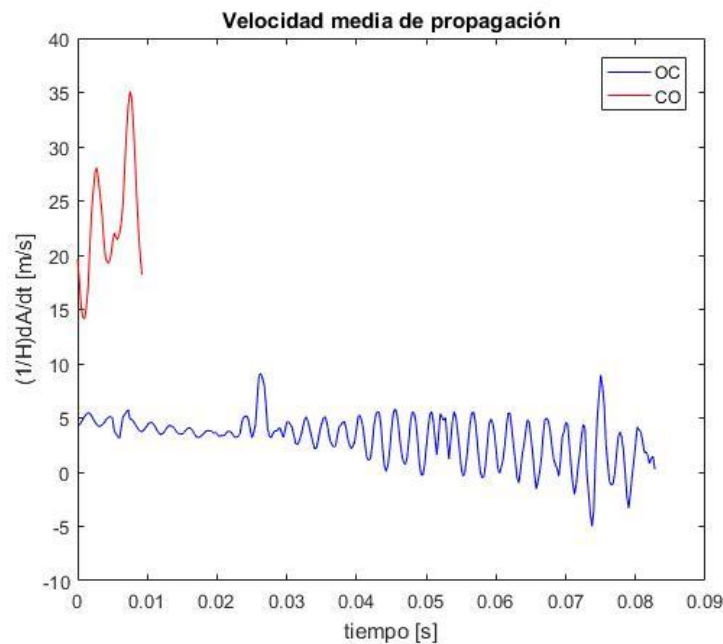


Figura 7.11: Velocidad media de propagación para distintas configuraciones.

En la Figura 7.11 se representa la velocidad media de propagación para la configuración CO (en rojo) y para la configuración OC (azul). Examinando dicha imagen, se puede concluir que para el segundo caso estudiado (configuración OC) la velocidad media es más baja que en la configuración CO. Incluso una vez que la llama está perturbada donde la velocidad aumenta sigue siendo inferior que en el primer caso. Esto está relacionado con las sobrepresiones que tiene que vencer la llama en el caso OC, las cuales hacen que avance más lento y, por tanto, su velocidad de propagación sea menor que en la configuración CO, donde dichas sobrepresiones ayudan a la llama a desplazarse.

Por otro lado, también se aprecia, comparando la Figura 7.4 y la Figura 7.9, que el número de celdas es mayor en la configuración abierto-cerrado. Sin embargo, el tamaño de los lóbulos en dicha configuración, en general, es menor que el tamaño del lóbulo principal del caso cerrado-abierto. Es decir, basándose en los perfiles característicos de cada una de las configuraciones (Figura 7.1, Figura 7.5 y Figura 7.6), se concluye que en el primer caso existe una celda grande acompañada de celdas mucho más pequeñas que ésta. Pero, en el segundo caso, existe un mayor número de celdas con un tamaño más parecido entre ellas.

7.2 Tipo de combustible

Los combustibles estudiados son metano y propano. Para poder comparar los datos obtenidos para ambos, se han mantenido fijos el resto de los parámetros. Es decir, se ha utilizado la misma configuración (abierto-cerrado), el mismo dosado (dosado estequiométrico) y el mismo material de la tapa superior de la cámara (vidrio) de espesor 19 mm.

A continuación, se muestran varios valores de número de Lewis efectivo y de temperatura adiabática, es decir, temperatura que se alcanza teóricamente, para distintos dosados para estos dos combustibles.

TABLA 7.1: PARÁMETROS DEL COMBUSTIBLE EXTRÍADO DE [27]

COMBUSTIBLE	ϕ	$T_b [K]$	Le_{eff}
<i>Propano</i>	0.8	2048.10	1.60
	1	2271.50	1.43
	1.2	2200.60	1.28
<i>Metano</i>	0.8	1992.31	1.02
	1	2222.16	1.03
	1.2	2132.02	1.05

Como se puede apreciar, estos parámetros sufren distinta variación dependiendo del combustible. Por ejemplo, el número de Lewis para el metano sufre variaciones del orden de la centésima mientras que para el propano las variaciones son mucho más significativas.

7.2.1 Metano

El metano es el hidrocarburo alcano más sencillo, cuya fórmula química es CH_4 . Es un gas incoloro, inodoro y no es soluble en agua.

Al haber usado la configuración OC, vidrio como material de la tapa y dosado igual a la unidad, los resultados para este apartado coinciden con los presentados en el apartado 7.1.2. Por consiguiente, la curva de porcentaje de área quemada se corresponde con la Figura 7.7, el ritmo de quemado viene dado en la Figura 7.8 y el número de celdas de este experimento se representa en la Figura 7.9.

Asimismo, el perfil característico de la llama de los experimentos realizados bajo estas condiciones se puede observar en la Figura 7.5 y en la Figura 7.6.

7.2.2 Propano

El propano, combustible fósil, es un gas incoloro e inodoro con un poder calorífico [J/mol] superior al metano por lo que la llama en las imágenes capturadas de los experimentos con este combustible tiene un mayor brillo lo que facilita la visualización y detección del frente.

A continuación, se muestra una imagen del frente de llama característico para este combustible en la configuración OC con dosado estequiométrico (Figura 7.12).

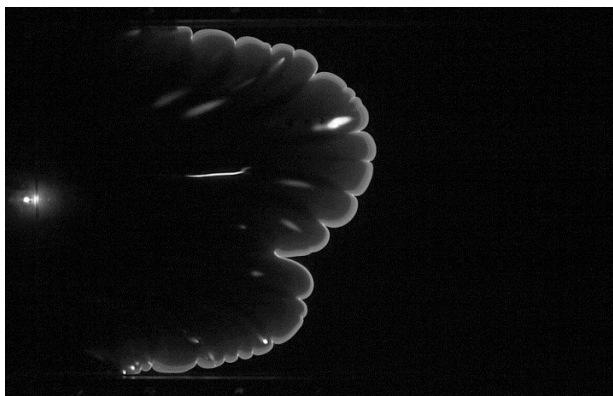


Figura 7.12: Frente de llama en la config. OC de propano con dosado 1 en $t=0.22s$.

Los resultados obtenidos para esta configuración son:

- Porcentaje de área quemada frente al tiempo.

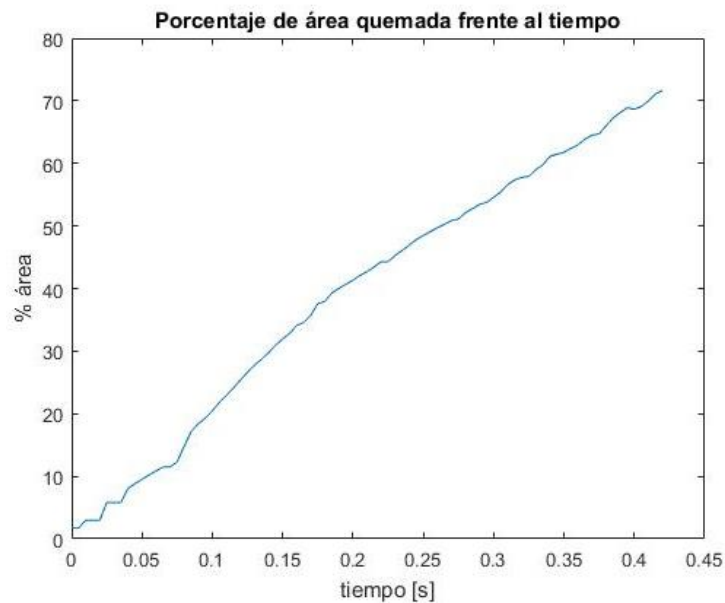


Figura 7.13: Porcentaje de área quemada en la config. OC de propano con dosado 1.

En la Figura 7.13 se representa el porcentaje de área quemada en cada instante de tiempo para el propano en configuración abierto-cerrado. En dicha imagen, se puede apreciar como aumenta el porcentaje de área quemada a medida que la llama avanza a través de la cámara de combustión.

Asimismo, también se puede percibir variaciones en la curva al inicio. Esto es debido a que la llama sufre ciertas inestabilidades en los primeros instantes de tiempo llegando incluso a desaparecer por uno de los laterales como se puede observar en la siguiente imagen (Figura 7.14).

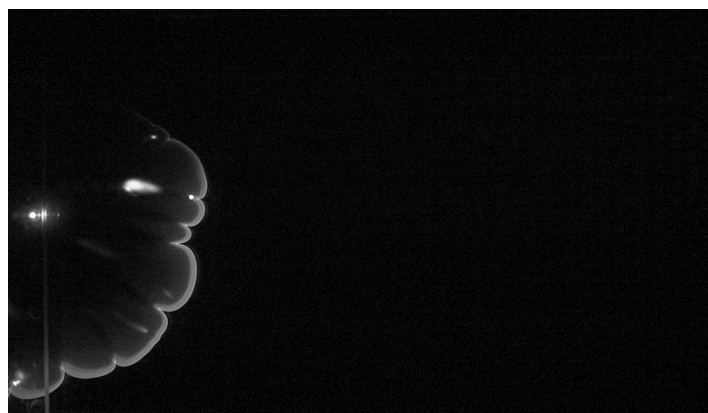


Figura 7.14: Frente de llama de propano en $t=0.08s$.

- Ritmo de quemado

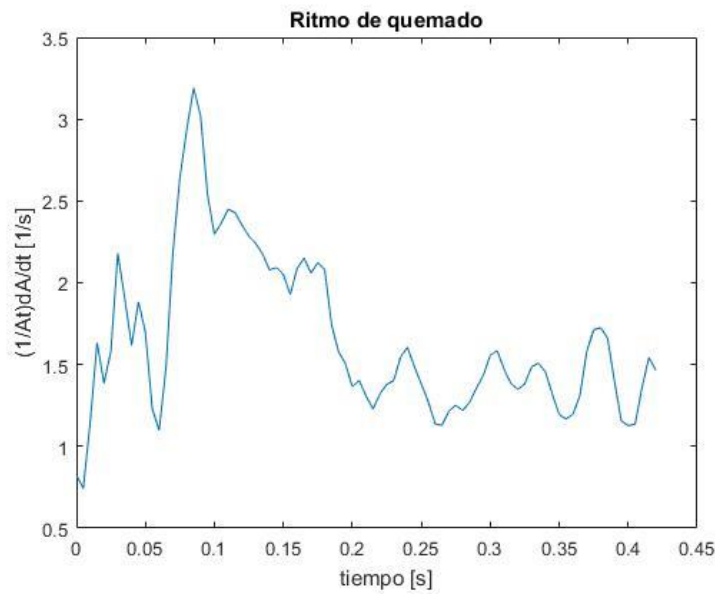


Figura 7.15: Ritmo de quemado en la configuración OC de propano con dosado 1.

La Figura 7.15 muestra la evolución del ritmo de quemado a lo largo del tiempo. Como se puede observar en dicha figura, este parámetro sufre grandes variaciones en los instantes iniciales debido a las propias instabilidades de la llama. Después, se siguen apreciando variaciones en la curva, pero menos acentuadas.

- Número de celdas frente al tiempo

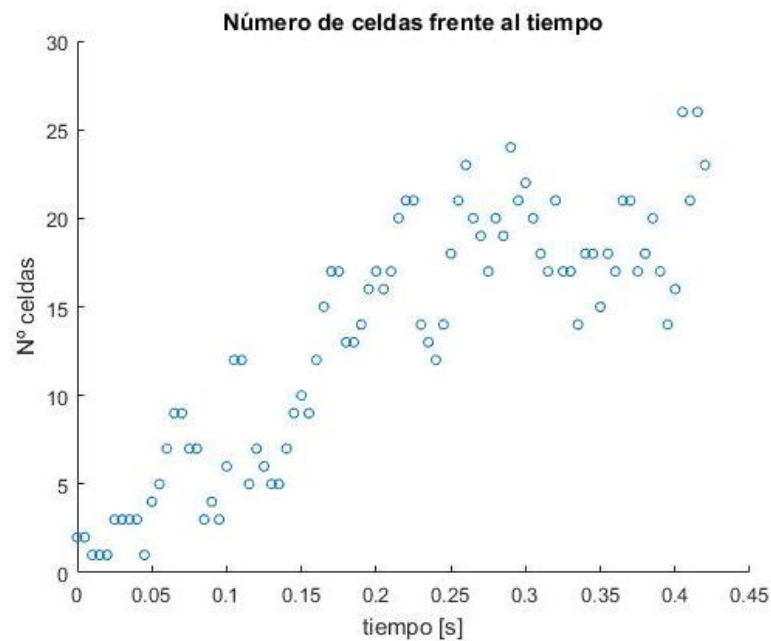


Figura 7.16: Número de celdas en la configuración OC de propano con dosado 1.

En la anterior imagen (Figura 7.16) se ha representado el número de celdas del frente de llama para cada instante de tiempo. Analizando los datos obtenidos para este parámetro, se observa que el número de lóbulos va creciendo a medida que la llama avanza sobre todo en los momentos iniciales. Después, sufre una pequeña bajada debido a que hay celdas que desaparecen dado que son absorbidas por otras más grandes. Sin embargo, al final del experimento vuelve a aumentar dicho número.

7.2.3 Comparación entre combustibles

En este apartado se va a realizar una comparación entre los distintos parámetros de los dos combustibles analizados.

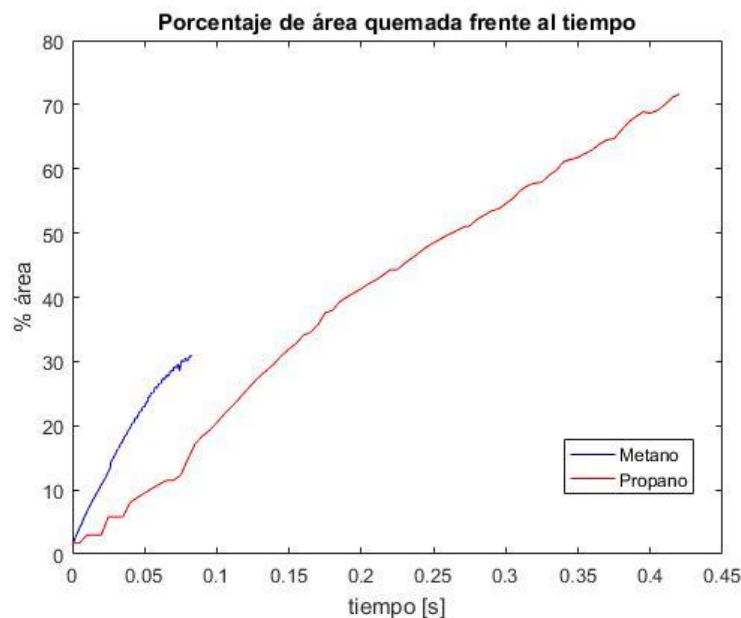


Figura 7.17: Comparación porcentaje de área para distintos combustibles.

En la Figura 7.17 se muestra la comparación del porcentaje de área quemado por cada uno de los combustibles estudiados. En ella, se observa que la escala de tiempos para el metano es del orden de 3 veces inferior a dicha escala para el propano. Es decir, para que la llama de propano queme el 20 % del área de la cámara han de pasar 0.15 segundos. Sin embargo, usando metano ese mismo porcentaje se alcanza en $t = 0.05$ segundos. Esto implica que la llama de metano quema área de forma más rápida, es decir, que avanza a una mayor velocidad que si se usa como combustible propano. Esto se debe a que la cadena carbonada del propano es de mayor longitud que la del metano, lo que conlleva que la masa molar del metano sea inferior. Por tanto, es coherente que la llama de propano se

desplace a una velocidad menor y, en consecuencia, tarde más tiempo en recorrer la cámara, es decir, que queme menos área en cada instante de tiempo. Además, como se puede apreciar en la TABLA 7.1, el número de Lewis efectivo, es decir, el de la mezcla y la temperatura adiabática son inferiores en el caso del metano.

Como el experimento de propano ha sido grabado para toda la cámara de combustión mientras que el de metano sólo para un tercio, no se va a comparar el ritmo de quemado dado que depende del área total, sino la velocidad media de propagación.

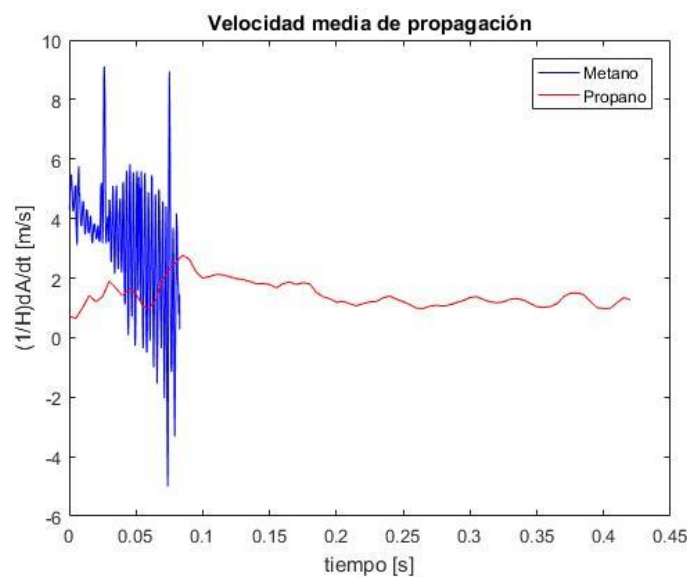


Figura 7.18: Velocidad media de propagación para distintos combustibles.

En la Figura 7.18 se representa la velocidad media de propagación para cada uno de los combustibles. A partir de ella, se puede concluir que el segundo caso estudiado (propano) tiene una velocidad media de propagación más baja y menos fluctuante que el metano. Incluso en los instantes iniciales donde el ritmo de quemado del propano alcanza sus valores más altos sigue siendo inferior que en el primer caso. Esto está relacionado con el parámetro anterior, es decir, con el área quemada a lo largo del tiempo, dado que, si la llama de metano quema más área en cada instante de tiempo, su velocidad media de propagación ha de ser superior a la del propano.

Por otro lado, también se puede percibir, comparando la Figura 7.9 y la Figura 7.16, que el número de celdas en el frente de llama de propano es ligeramente superior que para el metano. El tamaño de los lóbulos en la llama de propano, en general, sufre más variaciones que en el caso del metano. Es decir, basándose en los perfiles característicos de cada uno de los combustibles (Figura 7.5, Figura 7.6 y Figura 7.12), se concluye que en el

primer caso existe un tamaño de celda semejante para la mayoría de los lóbulos del frente de la llama. Además, el frente adopta una forma ‘semicircular’ que más adelante se convierte en un perfil casi plano. Pero, en el segundo caso, existe una mayor disparidad en el tamaño de las celdas y el frente de la llama toma una forma irregular a lo largo de todo el experimento.

7.3 Dosado

En este apartado se van a presentar los resultados para tres valores del dosado diferentes. Para poder comparar los datos obtenidos para cada uno de los valores del dosado, se han mantenido fijos el resto de los parámetros. Es decir, en todos los casos se ha usado como combustible el metano, como configuración el caso abierto-cerrado (OC) y una placa de vidrio de espesor igual a 19 mm como tapa superior de la cámara de combustión.

Los tres valores escogidos para el dosado son 0.8, 1 y 1.2 para así estudiar una mezcla pobre, una mezcla estequiométrica y una mezcla rica, respectivamente. Todos los experimentos de este apartado han sido grabados para un tercio de área de la cámara de combustión.

7.3.1 Mezcla estequiométrica

Una mezcla estequiométrica es aquella cuyo dosado es igual a la unidad y, por tanto, no existe ni exceso ni defecto de aire ni de combustible.

Al haber usado metano, la configuración OC y vidrio como material de la tapa, los resultados para este apartado coinciden con los presentados en el apartado 7.1.2. Por consiguiente, la curva de porcentaje de área quemada se corresponde con la Figura 7.7, el ritmo de quemado viene dado en la Figura 7.8 y el número de celdas de este experimento se representa en la Figura 7.9.

Asimismo, el perfil característico de la llama de los experimentos realizados bajo estas condiciones se puede observar en la Figura 7.5 y en la Figura 7.6.

7.3.2 Mezcla pobre

Este tipo de experimentos se consideran de mezcla pobre debido a que su dosado es inferior a la unidad (estequiométrico), por tanto, existe un defecto de combustible o lo que es lo mismo un exceso de aire.

La Figura 7.19 muestra la llama que se genera para metano con dosado 0.8 en configuración abierto-cerrado.

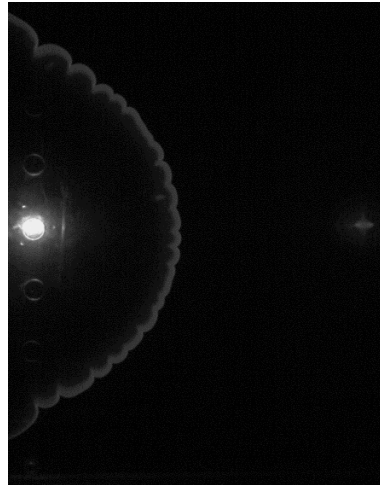


Figura 7.19: Frente de llama en la config. OC de metano con dosado 0.8 en $t=0.022s$

Sin embargo, y al igual que ocurría en el caso de dosado estequiométrico, a lo largo del experimento la llama se va desarrollando hasta adoptar un perfil mucho más vertical (Figura 7.20), abandonando la forma semicircular de los primeros instantes.

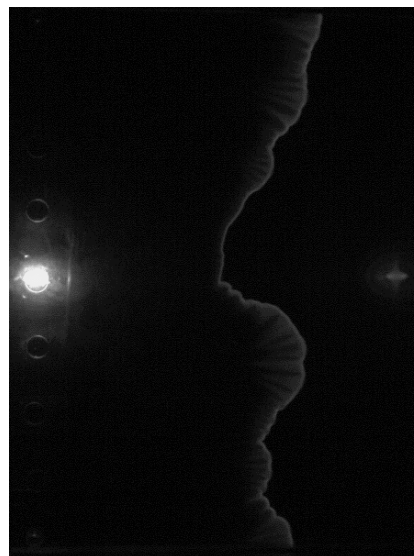


Figura 7.20: Frente de llama en la config. OC de metano con dosado 0.8 en $t=0.083s$

Los resultados obtenidos para esta configuración son:

- Porcentaje de área quemada frente al tiempo.

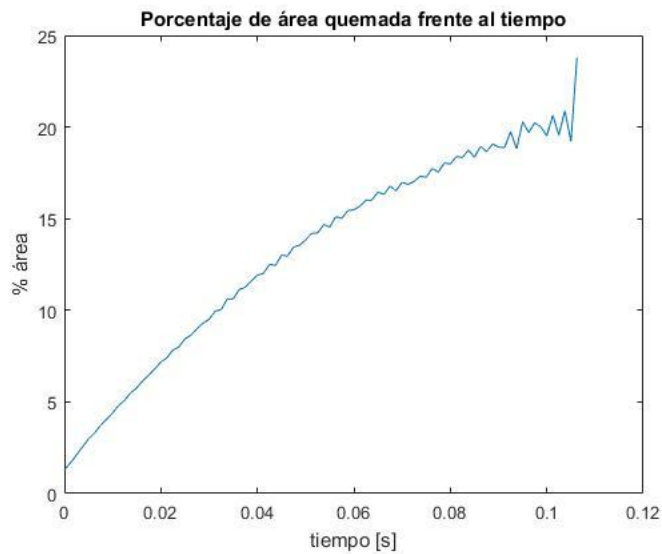


Figura 7.21: Porcentaje de área quemada en la config. OC de metano con dosado 0.8.

En la anterior imagen (Figura 7.21) se representa el porcentaje de área quemada en cada instante de tiempo para el dosado estudiado. Analizando esta imagen, se puede observar como dicho porcentaje aumenta según va avanzando la llama a lo largo de la cámara de combustión. Sin embargo, también se puede apreciar como en los instantes finales la curva sufre variaciones, llegando incluso a cambios bastante abruptos. Esto se debe a que la llama se perturba y oscila de manera más brusca.

- Ritmo de quemado

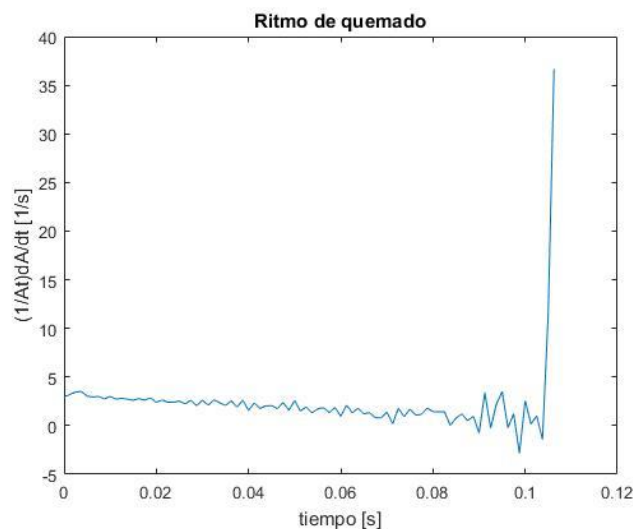


Figura 7.22: Ritmo de quemado en la configuración OC de metano con dosado 0.8.

La Figura 7.22 muestra la evolución que presenta el ritmo de quemado respecto al tiempo. Como se puede observar, dicho parámetro es bastante constante hasta que la llama se empieza a perturbar, momento en cual el ritmo de quemado se dispara.

- Número de celdas frente al tiempo

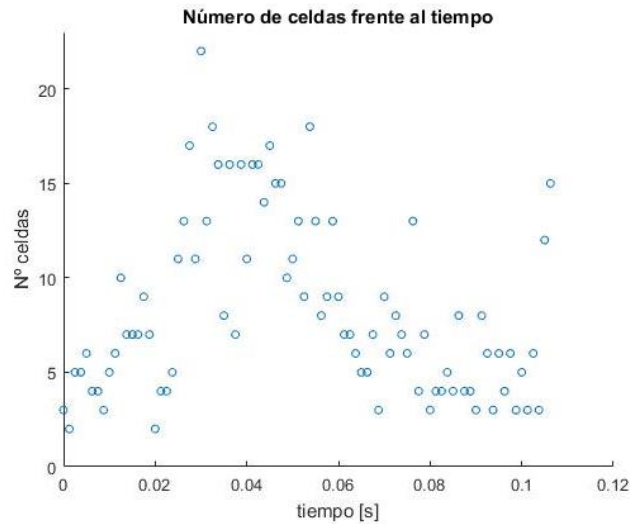


Figura 7.23: Número de celdas en la configuración OC de metano con dosado 0.8.

En la Figura 7.23 se ha graficado el número de celdas que aparece en el frente de llama para cada instante de tiempo. Analizando los datos obtenidos, se observa que dicho número varía debido a la creación y desaparición de lóbulos, alcanzando su máximo en torno a $t = 0.035$ segundos. Después, dicho número descende debido a que el perfil se hace más plano para finalmente aumenta debido a que la llama se perturba.

7.3.3 Mezcla rica

Los experimentos que se realizan con un dosado superior a la unidad (estequiométrico), se consideran de mezcla rica. Por tanto, existe un defecto de aire o lo que es lo mismo un exceso de combustible.

A continuación, se muestra una imagen del frente de llama característico para metano con dosado 1.2 en configuración abierto-cerrado (Figura 7.24).

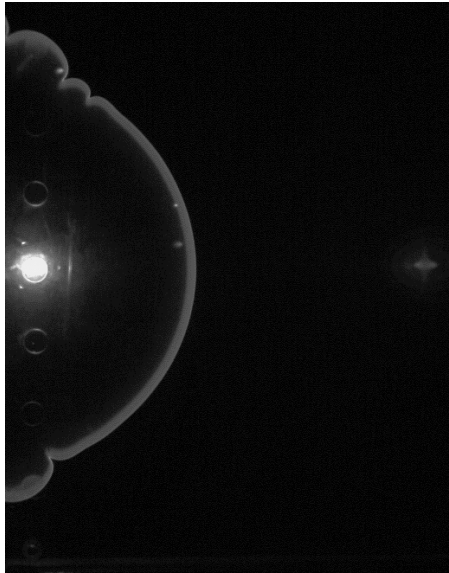


Figura 7.24: Frente de llama en la config. OC de metano con dosado 1.2 en $t=0.015s$.

No obstante, y como ocurría para los anteriores casos estudiados en este apartado, la llama se va desarrollando a lo largo del experimento lo que conlleva que acabe adoptando un perfil que abandona la forma semicircular que presenta en la Figura 6.20. Dicho perfil se muestra en la siguiente imagen (Figura 7.25).

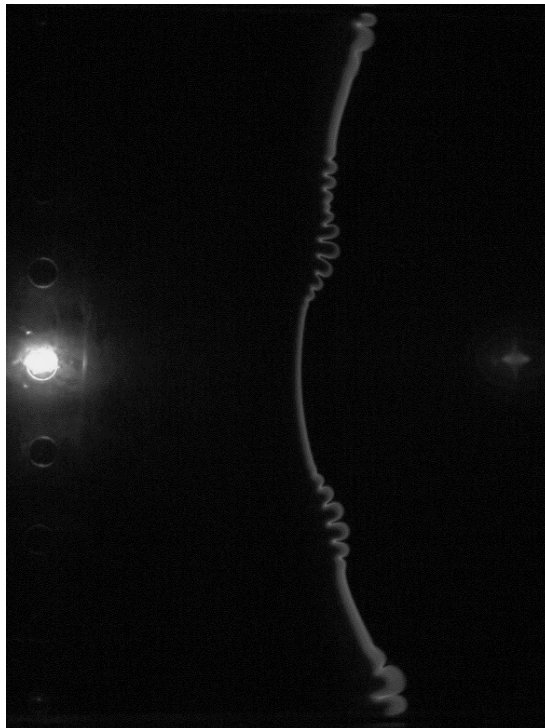


Figura 7.25: Frente de llama en la config. OC de metano con dosado 1.2 en $t=0.075s$.

Los resultados obtenidos para esta configuración se muestran a continuación.

- Porcentaje de área quemada frente al tiempo.

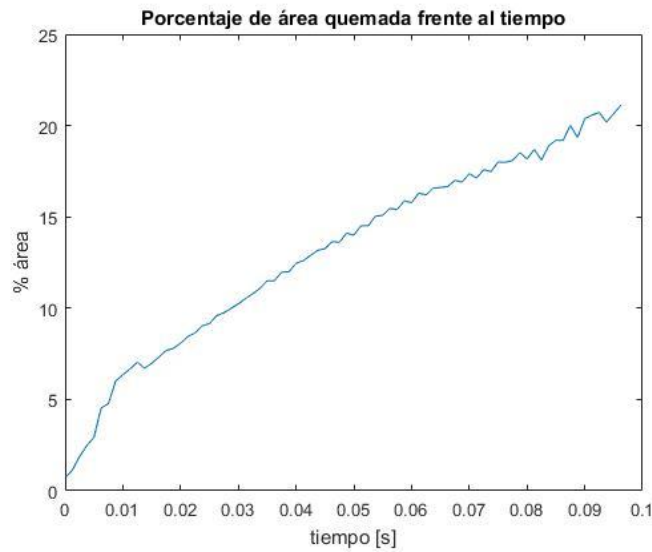


Figura 7.26: Porcentaje de área quemada en la config. OC de metano con dosado 1.2.

El porcentaje de área quemada respecto al tiempo para este dosado se ha representado en la Figura 7.26. En dicha imagen, se observa como el porcentaje de área quemada crece a un mayor ritmo en los primeros instantes, dado que la curva para esos tiempos tiene una mayor pendiente. Después, este parámetro sigue aumentando, pero en menor proporción, acabando con variaciones más bruscas debido al inicio de la perturbación de la llama. Como se puede observar la llama se perturba antes de alcanzar el tercio de área de la cámara de combustión, por lo que no es posible continuar su análisis.

- Ritmo de quemado

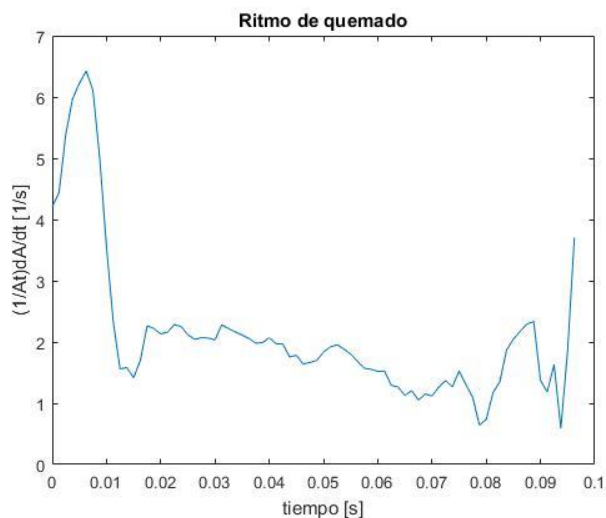


Figura 7.27: Ritmo de quemado en la configuración OC de metano con dosado 1.2.

En la Figura 7.27 se ha graficado el ritmo de quemado que presenta el metano para dosado igual a 1.2. Analizando esta imagen y relacionando este parámetro con el área quemada, se puede concluir que el ritmo de quemado es mayor en la zona inicial, zona en la cual también se apreciaba un aumento mayor del área quemada respecto al instante anterior. Después el ritmo de quemado desciende, dado que el porcentaje de área quemada aumenta en menor proporción, y vuelve a crecer cuando la llama se empieza a perturbar.

- Número de celdas frente al tiempo

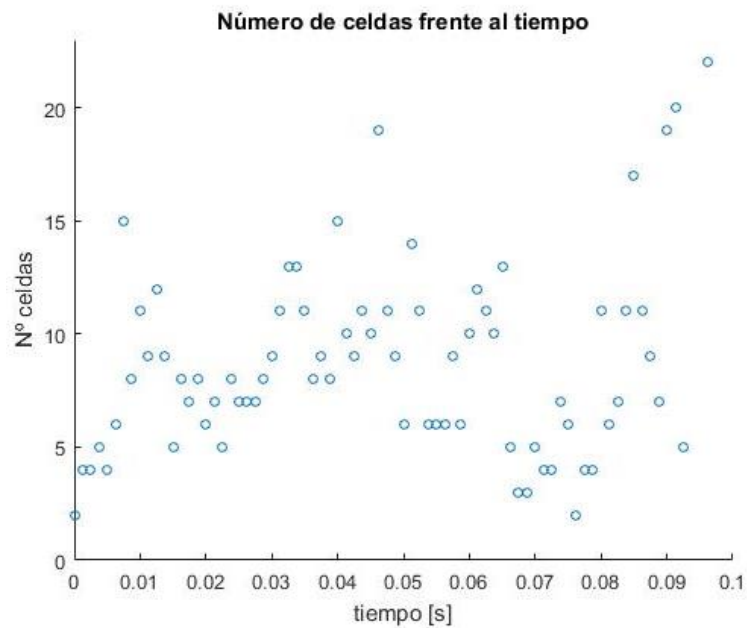


Figura 7.28: Número de celdas en la configuración OC de metano con dosado 1.2.

En la anterior imagen (Figura 7.28) se ha representado la evolución del número de celdas del frente de llama a lo largo del tiempo. Como se puede observar, el máximo número de celdas se alcanza cuando la llama se ha empezado a perturbar, es decir, al final del experimento.

7.3.4 Comparación entre distintos valores de dosado

En este apartado se va a realizar una comparación entre los resultados expuestos para los distintos valores escogidos para el dosado. Para ello, en la Figura 7.29 se muestra los porcentajes de área quemada de todos los casos para facilitar su análisis.

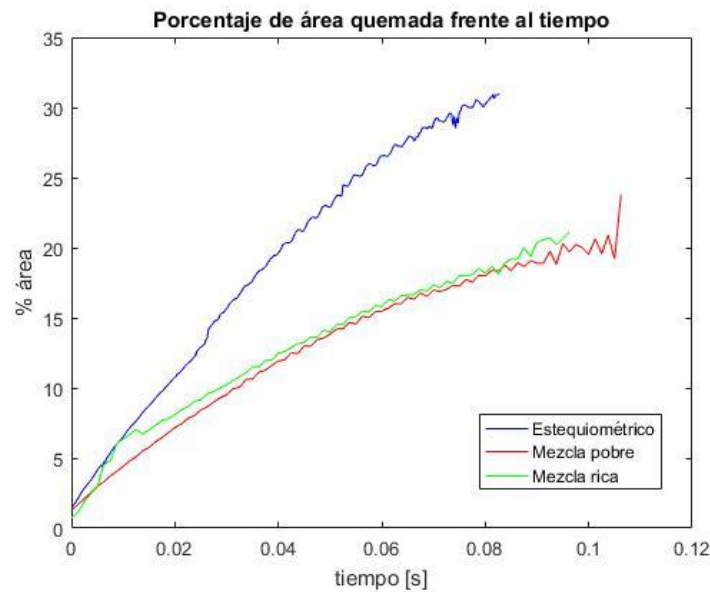


Figura 7.29: Comparación porcentaje de área para distintos dosados.

En primer lugar, analizando las curvas de la Figura 7.29 se observa que la escala de tiempos para los tres experimentos es aproximadamente del mismo orden. Esto implica que la llama de metano tarda aproximadamente el mismo tiempo en perturbarse para los tres valores escogidos de dosado. Sin embargo, esto no significa que se quema el mismo porcentaje de área en ese tiempo. Es decir, para el caso de mezcla pobre antes de que se perturbe la llama no se llega a alcanzar el 20% de área quemada. En el caso de mezcla rica, en ese momento el porcentaje de área quemada se encuentra en torno al 21%. Mientras que, para el dosado estequiométrico, se obtiene un porcentaje cercano al 33%. Por tanto, se concluye que para la mezcla cuyo dosado es igual a la unidad, la llama avanza más rápido que en los casos de mezcla pobre o rica, dado que quema más área en el mismo tiempo. Por el contrario, la llama se desplaza más lento en el caso de mezcla pobre dado que apenas alcanza en dicho tiempo el 20% de área quemada. Estos resultados concluyen que, si existe defecto o exceso de combustible, la llama quema más despacio que en el caso de dosado estequiométrico.

Además, lo anteriormente expuesto se puede corroborar analizando la velocidad media de propagación de los tres casos estudiados. Dicho parámetro se muestra en la Figura 7.30.

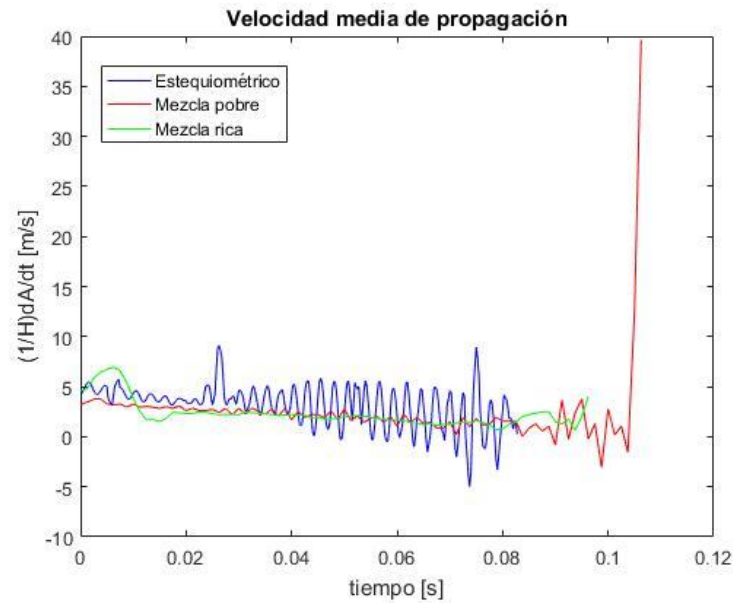


Figura 7.30: Velocidad media de propagación para distintos dosados.

Una vez analizada esta última gráfica, se puede concluir que, en general, para dosado estequiométrico se tiene una velocidad media de propagación más alta. Sin embargo, en los primeros instantes se observa como dicha velocidad es sobrepasada puntualmente por la velocidad media de la mezcla rica. En cambio, la velocidad media más baja se detecta en la mezcla pobre, siendo bastante constante hasta que la llama se perturba, disparándose a partir de ese momento. Como se ha comentado, esto está relacionado con el parámetro anterior, es decir, con el área quemada respecto al tiempo, dado que, si la llama de mezcla estequiométrica quema más área para la misma escala de tiempos, su velocidad media de propagación ha de ser superior a la velocidad de la mezcla pobre y rica.

Por otro lado, también se puede percibir, comparando la Figura 7.9, la Figura 7.23 y la Figura 7.28, que el número máximo de celdas se alcanza en el frente de llama de mezcla con dosado igual a 1. No obstante, no existe gran diferencia con los máximos alcanzados en las otras mezclas. Por el contrario, sí que se aprecian diferencias en los perfiles característicos de cada uno de los casos: dosado estequiométrico (Figura 7.5 y Figura 7.6), dosado 0.8 (Figura 7.19 y Figura 7.20) y dosado 1.2 (Figura 7.24 y Figura 7.25). Es decir, se puede observar que en el primer caso existe un tamaño de celda semejante para la mayoría de los lóbulos del frente de la llama en la forma ‘semicircular’. Además, cuando la llama se convierte en un perfil casi plano, adopta la forma más recta dentro de los tres casos analizados. En cambio, en la mezcla pobre, existe un tamaño de celda más pequeño

en ‘semicircular’ y cuando el frente de la llama ha tomado el perfil más plano se observa una forma mucho más irregular. Asimismo, en el caso de la mezcla rica, se puede percibir una celda dominante en el caso del perfil semicircular acompañada de pequeñas celdas a su alrededor y un perfil vertical mucho más curvo que en el caso de dosado estequiométrico. Esto se debe a que al variar el valor del dosado de la mezcla, cambia el número de Lewis y, por tanto, el tamaño de celda.

7.4 Material de la tapa de la cámara de combustión

Una vez analizados los resultados en función del tipo de configuración, del combustible usado y del dosado de la mezcla y habiendo observado que la llama sufre oscilaciones, en este apartado se van a proceder a dar explicación al origen de dichas oscilaciones. Para poder comparar los datos obtenidos para cada uno de los materiales escogidos, se han mantenido fijos el resto de los parámetros. Es decir, en todos los casos se ha usado dimetileter como combustible, configuración abierto-cerrado (OC) y el dosado de la mezcla igual a 0.7 (mezcla pobre), dado que se acentúan más las oscilaciones.

Los materiales escogidos son vidrio de 19 mm y metacrilato de 19 mm y de 15 mm de espesor para así poder estudiar cómo afecta el grosor de la tapa y también el material.

7.4.1 Vidrio

A continuación, se muestran los resultados obtenidos para el caso en el que la tapa superior de la cámara de combustión es de vidrio con un espesor de 19 milímetros.

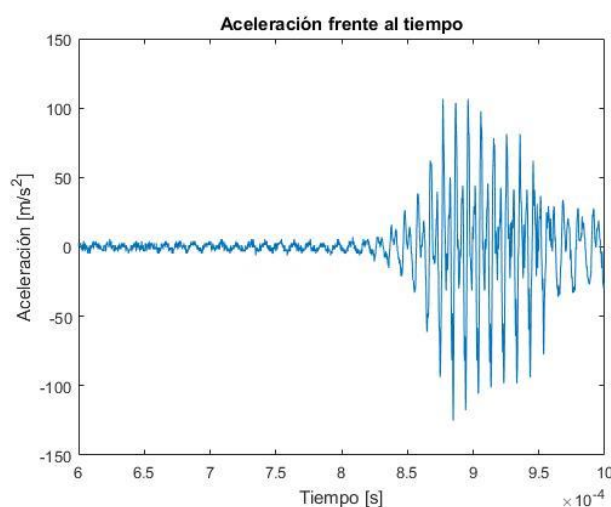


Figura 7.31: Aceleración frente al tiempo para tapa superior de vidrio.

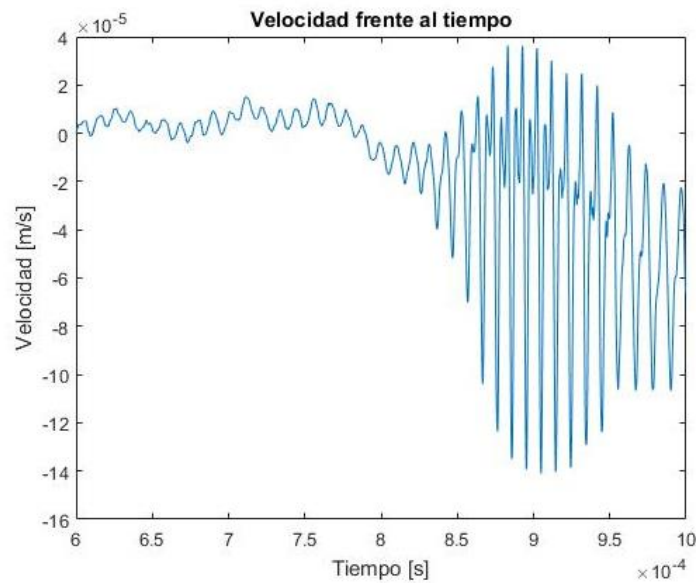


Figura 7.32: Velocidad frente al tiempo para tapa superior de vidrio.

La Figura 7.31 y Figura 7.32 se corresponden con la curva de aceleración y velocidad, respectivamente, que presenta la tapa de la cámara a causa del paso de la llama por el interior de ésta.

7.4.2 Metacrilato de 19 mm

En este apartado se muestran los gráficos de aceleración (Figura 7.33) y velocidad (Figura 7.34) que experimenta la lámina de metacrilato de 19 milímetros de espesor, que realiza la función de tapa de la cámara, durante el periodo en el que se produce la combustión en el interior de ésta.

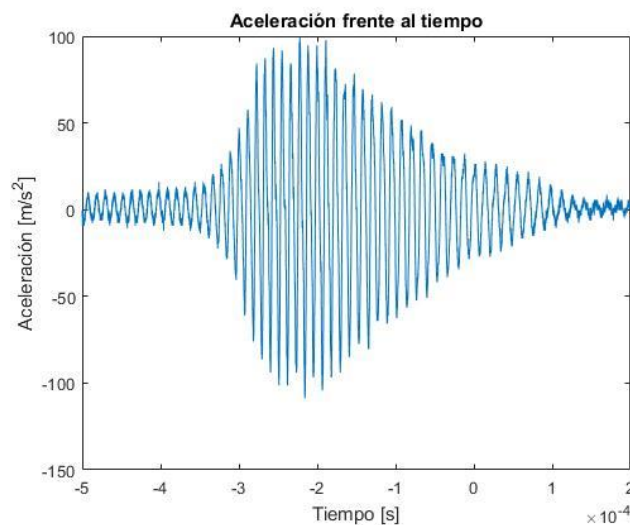


Figura 7.33: Aceleración frente al tiempo para tapa superior de metacrilato de 19mm.

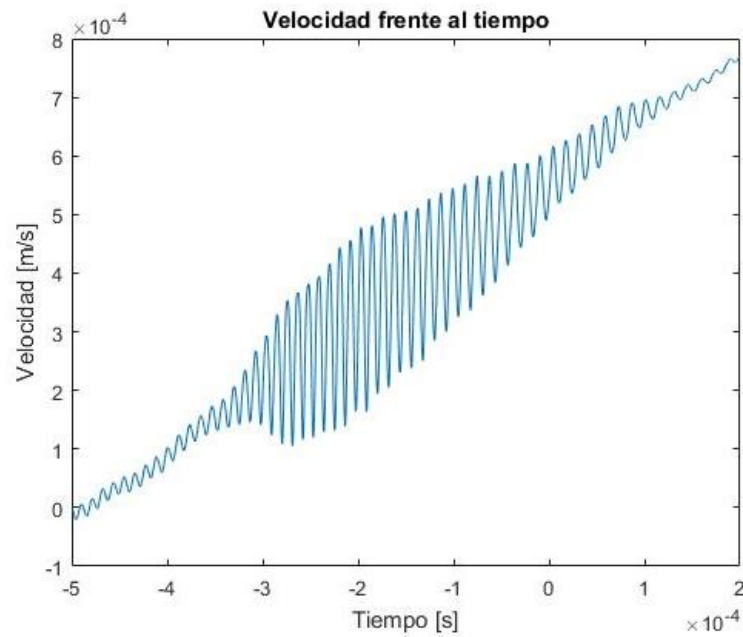


Figura 7.34: Velocidad frente al tiempo para tapa superior de metacrilato de 19mm.

7.4.3 Metacrilato de 15 mm

A continuación, se exponen los resultados obtenidos para el último caso estudiado, es decir, para la tapa de metacrilato con un espesor de 15 milímetros.

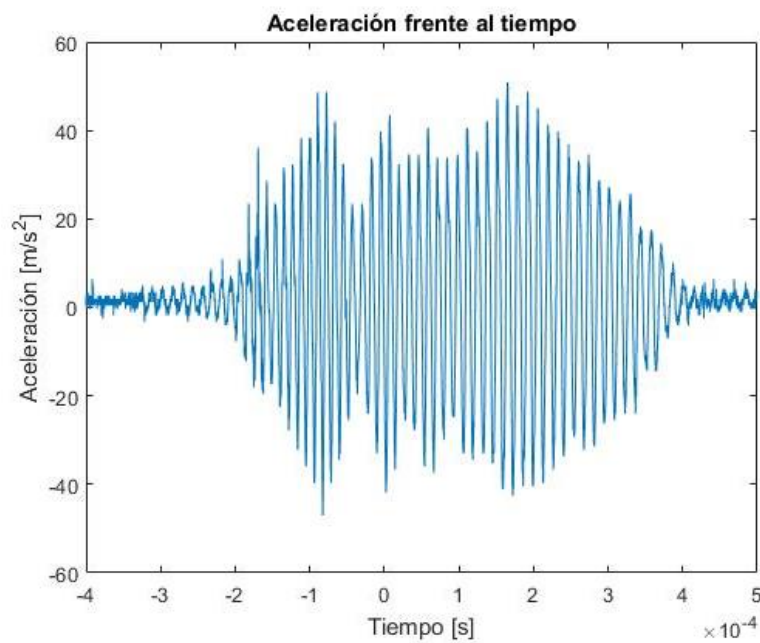


Figura 7.35: Aceleración frente al tiempo para tapa superior de metacrilato de 15mm.

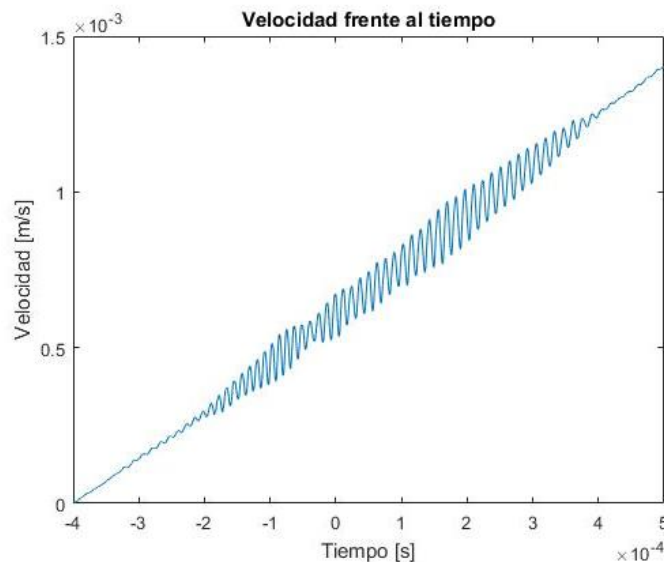


Figura 7.36: Velocidad frente al tiempo para tapa superior de metacrilato de 15mm.

En las imágenes anteriores se presentan las curvas correspondientes a la aceleración (Figura 7.35) y velocidad (Figura 7.36) que sufre la tapa de la cámara a causa del paso de la llama por el interior de ésta.

7.4.4 Comparación de las distintas tapas de la cámara

En este apartado se va a realizar una comparación entre los resultados expuestos para las distintas tapas de la cámara de combustión. Para ello, es necesario tener en cuenta que el vidrio es un material más rígido que el metacrilato, siendo este último mucho más flexible.

Por tanto, analizando las curvas obtenidas, se puede concluir que la tapa de metacrilato de espesor igual a 15 mm es la que tiene valores de aceleración y velocidad más pequeños.

Por el contrario, el vidrio es en el material que mayores velocidades de la placa se observan. Esto es consecuencia de que para dicho material también se perciben los valores de aceleración más altos. Por tanto, quedaría en una posición intermedia la tapa de metacrilato de grosor 19 mm.

Tras este estudio, se puede deducir que cuanto más delgada y de material más flexible es la placa, menos oscila, y la llama también. Sin embargo, cuanto más rígida y de mayor espesor es dicha placa, se recogen vibraciones de mayor amplitud con el

acelerómetro, y la llama oscila con más intensidad. Esto es debido a que al ser un material menos flexible amortigua peor las oscilaciones de la llama y, por ello, la aceleración y velocidad que sufre la tapa es mayor que en el caso de metacrilato. Este mismo razonamiento se puede seguir para explicar cómo afecta el espesor: cuanto menor sea el espesor, más flexible es la placa y, por consiguiente, mejor amortigua las oscilaciones provocando que las aceleraciones recogidas por el acelerómetro sean menores también. Por tanto, desde el punto de vista de la llama, si el material de la tapa amortigua más las oscilaciones, menos oscilará la propia llama.

8. Planificación y presupuesto

En este apartado, se va a presentar el presupuesto que conlleva la realización de esta tesis, así como el marco socio-económico en el que se engloba.

8.1 Presupuesto

Esta tesis se ha llevado a cabo desde octubre de 2017 a junio de 2018. Asimismo, la realización de este trabajo se puede dividir en varias tareas que se presentan a continuación junto con el tiempo estimado que se ha invertido en llevarlas a cabo. Hay que tener en cuenta que no son tareas totalmente independientes, por lo que algunas de ellas se han realizado de forma simultánea para poder ir mejorando los resultados que se iban obteniendo.

TABLA 8.1: TAREAS Y SU DURACIÓN

Tarea	Duración
Planteamiento y documentación	30 h
Experimentos en el laboratorio y extracción de imágenes	45 h
Desarrollo de los algoritmos	150 h
Análisis de datos	120 h
Extracción de resultados	70 h
Redacción de la memoria	60 h

El presupuesto de este proyecto está formado por diferentes costes entre los que se pueden identificar los siguientes:

- Coste de personal: en él se incluyen las personas que han participado en el desarrollo tanto de los experimentos como de los algoritmos. El salario para un investigador sin experiencia es de 984€/mes, lo que conlleva que el sueldo sea de 6.15€/hora. En el caso del tutor, el salario de un investigador

con experiencia es 1900€ al mes, trabajando 8 horas al día, supone 11.86€/hora [32].

- Coste de material: hace referencia al coste de todos los elementos que incluye la instalación en la cual se han llevado a cabo los experimentos.
- Coste de los equipos: se comprenden los costes relativos tanto a los programas de software como la cámara de vídeo y el ordenador de la instalación.

A continuación, se presenta el desglose del presupuesto para este trabajo.

TABLA 8.2: COSTE PERSONAL

<i>PERSONAL</i>	Categoría	Dedicación (h)	Coste unitario (€/h)	Coste (€)
Fernández Rodríguez, Miriam	Estudiante	475	6.15	2921.25
Martínez Ruiz, Daniel	Tutor	110	11.86	1304.6
TOTAL				4225.85 €

TABLA 8.3: COSTE EQUIPO

<i>EQUIPO</i>	COSTE (€)
Cámara de vídeo	70000
Portátil	700
Licencia Matlab [34]	69
Licencia Microsoft Office 365 [35]	3629
Image-J	0
TOTAL	74398 €

TABLA 8.4: COSTE MATERIAL

SISTEMA	PARTES	COSTE (€)
Cámara de combustión	Tapa de vidrio	435
	Tapas de metacrilato	400
	Marco de metacrilato	70
	Sellante de silicona	30
	Plancha de vinilo	15
	Gatos	300
Sistema de encendido	Bujía	12
	Batería	100
	Temporizador	200
Sistema de llenado	Tuberías y válvulas	50
	Controlador de combustible	2300
	Controlador de aire	900
Gases + regulador de presión	Metano	400
	DME	700
	Propano	75
TOTAL		5987€

Por tanto, el resumen del presupuesto es:

TABLA 8.5: RESUMEN PRESUPUESTO

CONCEPTO	COSTE (€)
Personal	4225.85
Equipos	74398
Material	5987
TOTAL	84610.85 €

8.2 Impacto socio-económico

Este proyecto ha sido desarrollado en España durante el año académico 2017/18 y ha sido financiado con fondos públicos de la Universidad Carlos III de Madrid. Aunque en los últimos años se ha disminuido el presupuesto en actividades de Investigación y Desarrollo (I+D), en el año 2017 se destinó alrededor de un 4% más a dicho ámbito respecto al curso anterior. Por tanto, no ha sido llevado a cabo en el entorno más desfavorable, si bien dicho presupuesto está lejos de alcanzar a sus máximos históricos [36].

Por otro lado, hoy en día, es primordial disminuir las emisiones para mejorar la salud y el medioambiente. Y eso pasa por aumentar el rendimiento de la combustión, dado que actualmente la mayoría de los ciudadanos del primer mundo hacen uso de medios de transporte, generalmente de combustión interna. Y esto influye de manera significativa en la contaminación del aire y, consecuentemente, en la calidad de éste. Los principales efectos a corto plazo de la contaminación atmosférica sobre la salud son el aumento de la mortalidad y de problemas respiratorios y cardiovasculares debido a alteraciones del funcionamiento pulmonar. Esto implica un incremento en la utilización de los servicios sanitarios [37].

Actualmente, se está intenta combatir estos altos niveles de contaminación. Un ejemplo de ello es el progreso en la integración de coches eléctricos e híbridos. Además, por normativa, todos los vehículos de combustión deben cumplir ciertas especificaciones de emisiones. Todo esto se encuentra regulado a través de las normas EURO, que limita las emisiones de contaminantes de los vehículos. Desde enero de 2014, se encuentra vigente la EURO 6 [8]. Sin embargo, el objetivo es reducir las emisiones de manera global. Para ello, es necesario emplear energías renovables en lugar de combustibles fósiles para la generación de electricidad.

Además, también se ha de reducir el uso de baterías recargables para generar potencia, dado que presentan altos índices de contaminación. Por ello, es de gran interés conseguir aumentar el rendimiento de los procesos de combustión en micromotores usando biocombustibles, los cuales ayudan a reducir los niveles de CO₂ a la atmósfera.

9. Conclusiones y trabajos futuros

En este proyecto se ha presentado una serie de algoritmos que permiten la detección del frente de llama en micro-cámaras de combustión, así como el porcentaje de área quemada, el ritmo de quemado, la velocidad media de propagación y el número de celdas para cada instante de tiempo. Mediante su uso, se ha podido comprobar que todos estos algoritmos desarrollados cumplen su función con bastante exactitud. Esto ha permitido comparar diferentes experimentos en función del tipo de configuración de la cámara de combustión, del tipo de combustible usado y de la cantidad de aire y combustible de la mezcla, es decir, el dosado. Con esto se han podido obtener varios resultados teniendo siempre como base el experimento con combustible metano de dosado estequiométrico, en configuración abierto-cerrado (OC) y usando como tapa de la cámara una placa hecha de vidrio de 19 mm.

En primer lugar, se ha podido verificar que la velocidad media de propagación para la configuración cerrado-abierto es muy superior al caso en el que se usa una configuración abierto-cerrado. Esto se debe a que, para quemar el mismo porcentaje de área, la llama en OC tarda en torno a 10 veces más que si la llama se propaga en la cámara en configuración CO. La razón principal es las sobrepresiones generadas en el proceso de propagación de llama. En un caso, dichas sobrepresiones ayudan a la llama a avanzar (CO) y, por el contrario, en el otro dificultan su desplazamiento (OC). Esto implica que la llama viaja a una velocidad superior por la cámara en configuración cerrado-abierto.

Asimismo, en ambos casos se identifica un perfil muy característico. En el primero (caso CO), se puede apreciar como existe un lóbulo dominante que se mantiene prácticamente fijo a lo largo del todo el experimento. Sin embargo, en el segundo caso, se observa en los primeros instantes un perfil semicircular que se irá desarrollando hasta convertirse en un perfil mucho más plano. Este desarrollo se mantiene en esta configuración aun variando el dosado de la mezcla, dado que se debe al efecto pistón que se genera y empuja a la llama homogenizando el perfil.

En segundo lugar, se ha comparado el tipo de combustible, es decir, metano con propano. Y se ha podido comprobar que, debido a que el propano posee una cadena carbonada de mayor longitud, su velocidad media de propagación es inferior y, por tanto, necesita aproximadamente 3 veces más el tiempo que invierte el metano en quemar la

misma área. Además, se puede observar que el propano adopta un perfil mucho más irregular durante todo el experimento y sin llegar a ser casi plano como ocurre con el metano.

Por último, si se analizan los experimentos desde el punto de vista del dosado, se ha podido concluir que la llama generada por una mezcla estequiométrica es la que quema más área por unidad de tiempo. Esto se debe a que no existe ni exceso ni defecto de aire ni de combustible. Por el contrario, se encuentra en la mezcla pobre la velocidad media de propagación más baja debido a que existe un defecto de combustible.

Por otro lado, en este trabajo también se han desarrollado algoritmos con los que poder analizar de una forma más cualitativa el origen de las oscilaciones y el efecto que tiene el material y el espesor de la tapa superior de la cámara de combustión sobre ellas. Se ha podido deducir que cuanto más flexible sea el material y menos espesor tenga, menos oscila y, en consecuencia, la llama también. Por tanto, el material en el que menos oscilaciones se detectan es en metacrilato de 15 mm de espesor, dado que presenta aceleraciones y velocidades más pequeñas. Por ello, parece que el causante de las oscilaciones de la placa es la propia propagación de la llama, pudiendo disminuir dichas oscilaciones si se rebaja el espesor y la rigidez del material de la placa superior de la cámara de combustión.

Los estudios realizados hasta el momento en los laboratorios de la Universidad Carlos III de Madrid, han permitido evolucionar de manera considerable en el análisis de los fenómenos presentes en la propagación de llamas de premezcla desde que se comenzó el montaje del prototipo en diciembre de 2016, mejorando las técnicas de grabación, así como la velocidad de captura, los métodos de ignición y la alimentación de la premezcla. Sin embargo, tras realizar el análisis de las imágenes en dos de las cuatro configuraciones posibles, para dos tipos de combustible y dos materiales, se puede comprobar que el estudio de los fenómenos generados dichos procesos aún está en vías de desarrollo.

Por ello, se podrían realizar mejoras tanto en el prototipo como en el código, así como abrir nuevas líneas de investigación.

Por un lado, se podría diseñar un sistema de placas de cierre a presión para los laterales de la cámara pero que a la vez no sean fijas para poder disponer las distintas

configuraciones de la cámara de combustión. De esta forma, se conseguiría un cierre más hermético de la cámara, pudiendo simular de forma más óptima dichas configuraciones.

Además, los experimentos han sido realizados usando como combustible principal metano para compararlo con propano (combustible fósil) y, en el caso del acelerómetro, dimetil éter (DME). No obstante, puede ser de gran interés realizar estos experimentos con otro tipo de biocombustibles, como el etanol, o usar dimetil éter para hacer los experimentos que se han llevado a cabo con metano y comparar resultados, dado que el objetivo final es poder usar biocombustibles ya que ayudan a disminuir los niveles de CO₂.

Por otro lado, sería interesante poder conocer la presión en el interior de la cámara y así cuantificar las sobrepresiones generadas en el proceso de combustión. Así como la energía mínima de encendido, dado que para mezclas muy ricas la bujía no era capaz de encenderse.

Como se ha comentado, la bujía de incandescencia produce la ignición de la premezcla. Sin embargo, al realizar dicha ignición desde un único punto se favorece que se generen perfiles curvos. Por tanto, otro aspecto a mejorar sería intentar llevar a cabo el encendido a través una línea de ignición. Pero esta línea no podría ser un hilo de ignición, dado que ya se experimentó y los resultados no fueron óptimos.

Por último, se podría estudiar el diseño de un nuevo método que pudiera detectar el frente de llama de forma precisa una vez se ha perturbado la llama.

Referencias bibliográficas

- [1] Acción de la UE. Policies, information and services. Paquete de medidas sobre clima y energía hasta 2020. [online]. Disponible en:
https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2020_es [Accedido 14 junio 2018]
- [2] Mapama.gob.es. (2018). Objetivos de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero - Mitigación: políticas y medidas - Cambio climático - mapama.es. [online]
Disponible en:
<http://www.mapama.gob.es/es/cambio-climatico/temas/mitigacion-politicas-y-medidas/objetivos.aspx> [Accedido 14 junio 2018]
- [3] Portillo, G. Energía biocombustible. Renovables verdes, 9 de julio de 2017. [online]. Disponible en:
<https://www.renovablesverdes.com/origenes-e-historia-de-los-biocombustibles/> [Accedido 11 junio 2018]
- [4] TextosCientíficos.com. Teoría de la llama. Tecnología de combustibles, 12 de abril de 2006. [online]. Disponible en:
<https://www.textoscientificos.com/energia/combustibles/teoria-llama> [Accedido 11 junio 2018]
- [5] Andrés Amell A. Tipos de llama. Facultad de Ingeniería, Grupo de ciencia y Tecnología del gas. Universidad de Antioquia. Medellín, septiembre de 2009.
- [6] Márquez Martínez, M. (2005). Combustión y quemadores (Novaprodúctica; 1). p. 69-71. Barcelona: Marcombo.
- [7] Anderson, R. (1965). Combustion Theory: The fundamental theory of chemically reacting flow systems (Williams, Forman A.). Journal of Chemical Education, 42(7), A548.

- [8] Total.es. (2018). Normas EURO - TOTAL España. [online] Disponible en: <http://www.total.es/total-medio-ambiente/desarrollo-sostenible/normas-euro.html>
- [9] Acción de la UE. Policies, information and services. Acuerdo de París [online]. Disponible en: https://ec.europa.eu/clima/policies/international/negotiations/paris_es [Accedido 14 junio 2018]
- [10] Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Protocolo de Kioto sobre cambio climático. Gob.mx. 11 de diciembre de 2016. [online]. Disponible en: <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/protocolo-de-kioto-sobre-cambio-climatico?idiom=es> [Accedido 14 junio 2018]
- [11] Ministerio de Fomento del Gobierno de España. Seguridad en caso de incendio. CTE. [online]. Disponible en: <https://www.codigotecnico.org/index.php/menu-seguridad-caso-incendio.html> [Accedido 16 junio 2018]
- [12] Universidad Carlos III de Madrid (2017). Procedimientos y normas para acceso a laboratorios de Ingeniería Térmica y de Fluidos. Madrid.
- [13] Sharif, J., Abid, M., and Ronney, P. D. (1999). Premixed-gas flame propagation in Hele-Shaw cells.
- [14] J. Wongwiwat, J. Gross, P. Ronney. Flame propagation in narrow channels at varying Lewis number. 25th ICDERS - August 2-7, 2015 – Leeds
- [15] Solsona García, D. (2015). Estudio de la velocidad de propagación de una llama dentro de una cámara prismática de altura reducida. Graduado en Ingeniería en Tecnologías Industriales. Universidad Carlos III de Madrid.
- [16] Zamora Hernández, F. (2017). Análisis de imágenes para experimentos de micro-combustión. Graduada en Ingeniería en Tecnologías Industriales. Universidad Carlos III de Madrid.

- [17] Antonio L. Sánchez Pérez, Marcos Vera, Immaculada Iglesias y Carlos Martínez. (2016). Apuntes de la Escuela Politécnica Superior, Grado de Ingeniería en Tecnologías Industriales. Universidad Carlos III de Madrid.
- [18] Creta, Francesco & Lamioni, Rachele & Lapenna, Pasquale & Troiani, Guido. (2016). Interplay of Darrieus-Landau instability and weak turbulence in premixed flame propagation. *Physical Review E*. 94.
- [19] P. G. Saffman, Sir Geoffrey Taylor, F. R. S. The penetration of a fluid into a porous medium or Hele-Shaw cell containing a more viscous liquid. *Proc. R. Soc. Lond. A* 1958 245 312-329; DOI: 10.1098/rspa.1958.0085. Published 24 June 1958.
- [20] Sang Hun Kang. (2003). A computational study of SaffmanTaylor instability in premixed flames. *Combustion Theory and Modelling*, 7(2), 343-363.
- [21] Pilar López González-Nieto. (2004). La mezcla turbulenta por convección gravitatoria: modelizacio experimental y aplicación a situaciones atmosféricas. Madrid. p. 51-57.
- [22] Rayleigh, M.A, F.R.S. (1878). The explanation of certain acoustical phenomenal. Nature Publishing Group
- [23] Sivashinsky, Gregory. (1977). Diffusional-Thermal Theory of Cellular Flames. *Combustion science and technology*. 15. 137-145.
- [24] P. Clavin. (1994). Premixed combustión and gasdynamics. *Annual Reviews Fluid Mech*. 26: 321.
- [25] P. Clavin, Pierre Pelcé, Longting He. (1990). One-dimensional vibratory instability of planar flames propagating in tubes. *J. Fluid Mech. Great Britain*. 216. p. 299-322.
- [26] Honeywell. Datasheet Model JTF. Sensing and Control. Mayo 2008. Douglas, USA.

- [27] Veiga López, F., Martínez Ruiz, D., Sánchez Sanz, M., Fernández Tazarro, E. (2018). Experimental Analysis of Oscillatory Premixed Flames in a Hele-Shaw Cell Open at the Ignition End. Departamento de Ingeniería Térmica y de Fluidos. Universidad Carlos III de Madrid.
- [28] National Institute of Standards and Technology. U.S Department of Commerce. Libro del Web de Química del NIST, SRD 69. Methane. [online]. Disponible en: <https://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=C74828&Units=SI&Mask=1#Thermo-Gas> [Accedido 8 junio 2018]
- [29] National Institute of Standards and Technology. U.S Department of Commerce. Libro del Web de Química del NIST, SRD 69. Propane. [online]. Disponible en: <https://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=C74986&Units=SI&Mask=1#Thermo-Gas> [Accedido 8 junio 2018]
- [30] Office of Energy Efficiency & Renewable Energy. U.S Department of Energy. [online]. Disponible en: <https://www.fueleconomy.gov/feg/eslpg.shtml> [Accedido 12 junio 2018]
- [31] Puig Adam P. (1972) Cálculo Integral Aplicado a la Física y Técnica. Biblioteca Matemática, p. 286-287
- [32] Part of WageIndicator Foundation. (2018). Salario. Tusalarario.es. [online]. Disponible en: <https://tusalarario.es/salario> [Accedido 17 junio 2018]
- [33] Boletín Oficial del Estado del viernes 12 de junio de 2015. Número 140. Ministerio de Economía y Competitividad. Artículo 5
- [34] Matlab Mathworks Products. es.mathworks. [online]. Disponible en: https://es.mathworks.com/store/link/products/student/new?s_tid=ac_buy_sv_cta [Accedido 15 junio 2018]

- [35] Microsoft Office. Productos Office. [online]. Disponible en: <https://products.office.com/en-in/compare-all-microsoft-office-products?tab=1> [Accedido 15 junio 2018]
- [36] Boletín Oficial del Estado. Disposiciones Generales. Núm. 153. Sec. I. Publicado el 28 de junio de 2017.
- [37] Ballester Díez, F., Tenías, J. and Pérez-Hoyos, S. (2017). Efectos de la contaminación atmosférica sobre la salud: una introducción. [online] Scielo.isciii.es. Disponible en: http://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1135-57271999000200002 [Accedido 10 junio 2018]
- [38] Jewell, W. Saffman-Taylor Instability. Video publicado 20 agosto de 2012. Youtube.com. [online]. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=HZ3CYY0zKGQ> [Accedido 16 junio 2018]
- [39] Andreas V. Salario Mínimo 2018. Madrid, España [online]. Disponible en: <http://www.salariominimo.es/> [Accedido 17 junio 2018]